



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO  
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

ANNE RIEKKI  
KUIVIEN LUJITTEIDEN KÄYTTÖ ATL-TEKNIKASSA

Kandidaatintyö

Tarkastajat: professori Mikko Kanerva  
Maija Hoikkanen, Ahlstrom-Munksjö  
Glassfibre Oy  
12.10.2017

## TIIVISTELMÄ

**ANNE RIEKKI:** Kuivien lujitteiden käyttö ATL-tekniikassa

Tampereen teknillinen yliopisto

Kandidaatintyö, 34 sivua

Lokakuu 2017

Teknisten tieteiden materiaalitekniikan TkK-tutkinto-ohjelma

Pääaine: Materiaalitekniikka

Tarkastajat: Professori Mikko Kanerva, Maija Hoikkanen

Avainsanat: nauhalaminointi, kuitulaminointi, hiilikuitu, lasikuitu, E-lasikuitu, ATL, automated tape laying, AFP, automated fiber placement

Komposiitteja on perinteisesti valmistettu käsityönä, mutta jo vuosikymmeniä on komposiittituotteiden valmistuksessa hyödynnetty myös automatisoituja valmistusmenetelmiä. Materiaalivaihtoehtoja on lukuisia, esimerkiksi muovimatriisiin voidaan lisätä lujitteena hiili-, lasi- tai aramidikuituja. Automatisointia käytetään parantamaan valmiin tuotteen laatua, ja lisäksi tuotteiden tasalaatuisuus paranee.

Tämä kandidaatintyö on kirjallisuuskatsaus kahteen toisiaan muistuttavaan automatisoituun valmistusmenetelmään. Työssä tutustutaan automatisoituun nauhalaminointiin (ATL) ja automatisoituun kuitulaminointiin (AFP) sekä niissä käytettyihin materiaaleihin. Myös muutamia teollisuudenaloja ja käytännön sovelluskohteita, jotka näitä valmistusmenetelmiä hyödyntävät, on esitelty.

Automatisoitu nauhalaminointi (ATL) hyödyntää erilaisia leveitä lujitemateriaaleja. Perinteisesti niin sanotut prepreg-teipit, eli esikyllästetyt puolivalmisteet, ovat olleet valtakäytössä, mutta tässä työssä tutustuttiin myös kuiviin lujitteisiin. Kuivien lujitteiden käyttö ATL:ssa vaatii ottamaan huomioon erilaiset prosessiparametrit prepregeihin verrattuna. Esimerkiksi kuivien lujitteiden jäykkyys edellyttää pienempiä jännityksiä valmistuksen aikana, eikä tuotantonopeutta välttämättä saada yhtä suureksi kuin prepregien kanssa. Kuivia lujitteita käyttämällä voivat ATL:n kustannukset pienentyä verrattaessa prepreg-materiaalien käyttöön. Automatisoidussa kuitulaminoinnissa (AFP) käytetään kapeita teippejä ja sillä on mahdollista valmistaa monimutkaisempia muotoja sisältäviä komposiittituotteita, mutta valmistusmenetelmä muutoin on hyvin samankaltainen ATL:n kanssa.

ATL-valmistuksessa hyödynnetään paljon prepreg-lujitteita. Kuitenkin kuivilla lujitteilla, esimerkiksi hiili- ja lasikuitupreformeilla, on mahdollista saada valmistus edullisemmaksi ja laadukkaammaksi. Prepregit ovat kuitenkin olleet valtakäytössä, mutta myös kuiville lujitteille löytyy käyttökohteita. Yleisesti ATL:a hyödynnetään nykyään matkustaja- ja sotilaslentokoneiden ja tuulivoimaloiden osien valmistuksessa. Myös auto-teollisuus on alkanut hyödyntää automatisoituja valmistusmenetelmiä. Työssä kuitenkin havaittiin kuivien lujitteiden käytön yhä olevan vähäisempää kuin prepregien.

## ABSTRACT

**ANNE RIEKKI:** Automated Tape Laying of Dry Reinforcements for Composites

Tampere University of Technology

Bachelor's thesis, 34 pages

October 2017

Bachelor of Science in Material Technology, Faculty of Engineering Science

Major: Material Science

Examiners: Professor Mikko Kanerva, Maija Hoikkanen

Avainsanat: tape laying, tape placement, fiber placement, carbon fiber, glass fiber, E-glass fiber, ATL, automated tape laying, automated tape placement, AFP, automated fiber placement

Traditionally, composites have been manufactured by hand, but already for decades, there has also been automatized manufacturing technologies for composite products. There are several types of materials that can be used for automated manufacturing machines; for example, carbon fibers, glass fibers or aramid fibers can be impregnated by a polymer matrix to form typical pre-impregnated (prepreg) tapes used in ATL and AFP. By automatizing the manufacturing process, the quality and consistency of the complete products are enhanced.

This Bachelor's thesis is a literature review of two automated manufacturing methods that resemble each other. In this thesis, automated tape laying (ATL) and automated fiber placement (AFP) and the materials used in them are studied. Also, typical fields industry that utilize ATL and AFP, as well as practical applications are presented.

Relatively wide prepreg-tapes are used in ATL machines. Currently, prepreg-tapes are dominantly used but dry reinforcements are also explored in this thesis. The use of dry reinforcements in ATL requires different process parameters compared to the use of prepreps. For example, the stiffness of dry fibers leads to the requirement of using low fiber tensions during lamination. It is also difficult to increase the laying speed as high as it is with prepreps. As an advantage, by using dry reinforcements, the costs of ATL manufacturing can be decreased. AFP utilizes bands of narrow tapes and it is possible to produce more complex parts than with ATL. Otherwise the AFP-process resembles the ATL-process.

Prepreps are widely used in ATL. However, with dry reinforcements, for example, carbon and glass fiber preforms, it is possible to lower the costs of manufacturing and make the quality of the final products will be improved. Prepreps have been dominant in the market of reinforcements, but there are also applications for dry reinforcements. In general, ATL machines are used in military and civil (transport) aircraft manufacturing and also in the wind power industry. Recently the car industry has started to utilize automated manufacturing processes. As a conclusion, it was found in this thesis that using dry fibers is still more uncommon than using prepreps.

## ALKUSANAT

Haluan kiittää Maija Hoikkasta Ahlstrom-Munksjö Glassfibre Oy:stä tästä mielenkiintoisesta aiheesta. Olen myös kiitollinen professori Mikko Kanervalle työni ohjaamisesta. Molemmat ovat auttaneet tausta-aineiston ja lähdekirjallisuuden etsimisessä ja vastanneet kysymyksiini aina perusteellisesti. Olen saanut runsaasti apua myös työn viimeistelyvaiheessa, kiitos siitä molemmille.

Aihe oli aluksi minulle vieras, mutta Maijan ja Mikon kanssa käymieni keskustelujen ja sähköpostiviestittelyjen avulla aiheeseen perehtyminen helpottui. Lopulta koin olevani etuoikeutettu tästä mahdollisuudesta yhdistää Tampereen teknillisen yliopiston vankka teoriaosaaminen yrityksen ammattiosaamiseen.

Lisäksi haluan kiittää kanssaopiskelijoitani kaikesta siitä henkisestä tuesta, mitä olen tämän kandidaatintyön aikana heiltä saanut. Toivottavasti pystyn jatkossa auttamaan teitä yhtä paljon kuin te olette minua auttaneet.

Tampereella 12.10.2017

Anne Riekkö

## SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO.....	1
2. KOMPOSIITIT.....	2
2.1. Rakenne.....	2
2.2. Materiaalit .....	4
2.3. Valmistusmenetelmät.....	5
3. AUTOMATISOIDUT KOMPOSIITTIIEN VALMISTUSMENETELMÄT .....	7
3.1. Automatisoitu nauhalaminointi (ATL) .....	8
3.2. Automatisoitu kuitulaminointi (AFP).....	10
3.3. ATL- ja AFP -valmistuksen prosessiparametrit .....	13
4. MATERIAALIT ATL- JA AFP-LAITTEILLE .....	15
4.1. Kuivat lujitteet .....	15
4.1.1. Hiilikuitu .....	17
4.1.2. Lasikuitu.....	19
4.2. Prepreg-lujitteet .....	20
4.2.1. Kertamuovit.....	20
4.2.2. Kestomuovit .....	22
5. SOVELLUSKOHTEET.....	26
5.1. Energiateollisuus .....	26
5.2. Ilmailuteollisuus .....	26
5.3. Auto- ja veneteollisuus .....	27
6. YHTEENVETO.....	29
LÄHTEET .....	30

# 1. JOHDANTO

Komposiitit ovat materiaaleja, joissa yhdistyy vähintään kaksi eri materiaalia. Nämä materiaalit muodostavat komposiitissa lujite- ja matriisiosan. Komposiitteja voidaan käyttää muun muassa tuotteissa, joihin halutaan hyviä mekaanisia ominaisuuksia ilman suurta massaa. Lasi- tai hiilikuitulujitteisilla muovikomposiiteilla voidaan korvata metalliosia muun muassa autonvalmistusteollisuudessa. Komposiitit ovat perinteisiä metalliosia kevyempiä, mutta niiltä vaaditut ominaisuudet, kuten lujuus, ovat massayksikköä kohden paremmat kuin metalleilla. Näin suhteutettuna esimerkiksi hiilikuitukomposiittien ominaislujuus on noin kaksinkertainen teräkseen nähden [1, s. 596-600]. Hyötynä on se, että kevyempiä osia käyttämällä esimerkiksi polttoainekustannukset pienenevät. Tämän vuoksi myös ilmailuteollisuus käyttää komposiittirakenteita.

Komposiitteja on perinteisesti valmistettu käsityönä. Automatisoidut valmistusmenetelmät tuottavat kuitenkin laadukkaampia ja yhtenäisempiä tuotteita kuin käsityöhön perustuvat valmistusmenetelmät. Taloudellisesti ajateltuna työvoimakustannukset pienenevät automatisaation lisääntyessä, mutta haittapuolena on valmistuslaitteiden korkeat hinnat.

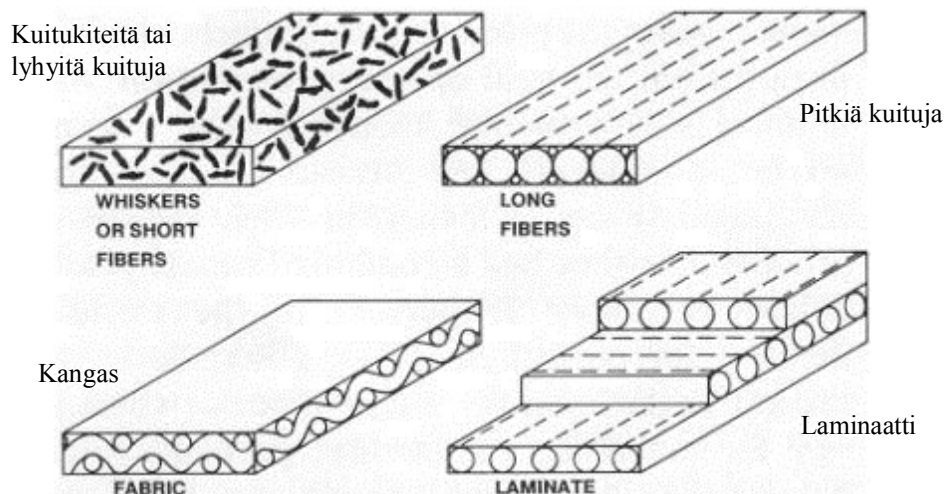
Tämän kandidaatintyön tarkoituksena on antaa yleinen katsaus komposiittien automatisoituihin valmistusmenetelmiin tällä hetkellä. Erityisesti pyrkimyksenä on keskittyä automated tape placement –valmistusmenetelmään (ATL) eli nauhalaminointiin. Työssä tätä ATL-menetelmää verrataan kuitulaminointiin eli automated fiber placement –menetelmään (AFP).

Työ on kirjallisuuskatsaus ja tavoitteena on syventyä ATL:ssa lujitteena käytettävistä materiaaleista erityisesti lasin käyttöön. Työssä on tarkoitus tutkia myös muiden kuivien lujitteiden sekä prepregien eli esikyllästettyjen puolivalmisteiden käyttöä. Lisäksi vertaillaan erilaisia lujitemateriaaleja keskenään. Materiaaleissa otetaan huomioon myös AFP-valmistuksessa käytetyt tuotteet.

## 2. KOMPOSIITIT

### 2.1. Rakenne

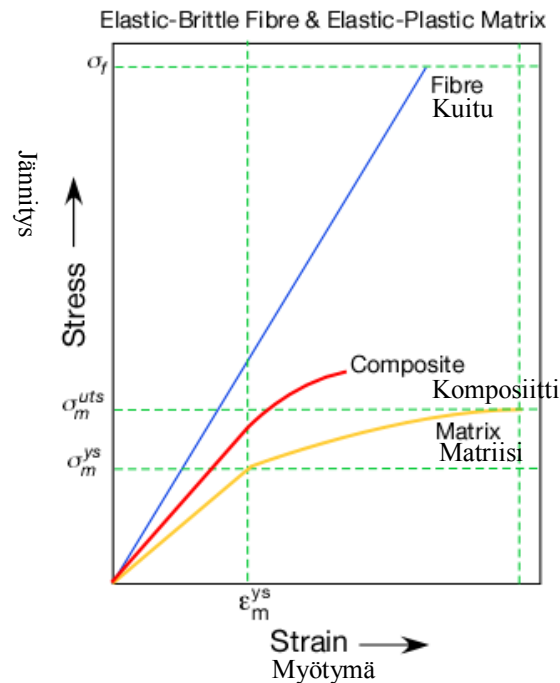
Komposiitti tarkoittaa kahden tai useamman erilaisen materiaalin yhdistelmää, joissa materiaalit eivät ole lienneet tai sulautuneet toisiinsa. Komposiitin rakenne koostuu matriisista ja lujitteesta. Matriisi sitoo komposiitin muut aineet yhteen. Esimerkiksi betoni on komposiitti, joka koostuu sementistä ja hiekasta. [1, s. 628; 2, s. 17] Matriisi voi olla esimerkiksi muovia, kuten tämän työn nauhalaminoinnin (automated tape laying, ATL) ja kuitulaminoinnin (automated fiber placement, AFP) tapauksessa. Lujitteina kyseisissä valmistusmenetelmissä käytetään erilaisia kuituja. Kuitujen lisäksi komposiittien lujittaminen on voitu tehdä rakenteellisesti tai komposiitit voivat olla partikkelilujitettuja [1, s. 629]. Kuvassa 1 on muutama erilainen komposiittirakenne, jossa lujitteena on käytetty esimerkiksi lyhyitä tai pitkiä kuituja.



**Kuva 1.** Skemaattisia kuvia erilaisista lujitekonsepteista komposiittilaminaateissa [3].

Komposiittien ominaisuudet ovat matriisin ja lujitteen yhdessä muodostamat. Esimerkiksi mekaaniset ominaisuudet ovat paremmat kuin pelkällä matriisilla, mutta huonommat kuin lujitteella, kuten kuvan 2 jännitys-myötymäkuvaajasta nähdään. Komposiittien eduksi perinteisiin materiaaleihin verrattuna luetaan muun muassa parempi lujuus ja jäykkyys ominaispainoon suhteutettuna sekä mahdollisuus suunnata lujitekuidut suurimman rasituksen suuntaan. Komposiitteja on käytetty 1900-luvun alusta alkaen, ja ne ovat vaihtoehtoja muun muassa metalleille. Lentokone- ja veneteollisuus ovat merkittäviä komposiittimateriaaleja tuotteissa hyödyntäviä teollisuudenaloja. [1, s. 628; 2, s. 13] Komposiitteja käytetään, jotta tuotteiden rakenteet saadaan kevyemmiksi ja kappaleiden tuotantokustannuksia alennettua. On arvioitu, että ilmailuteollisuudessa

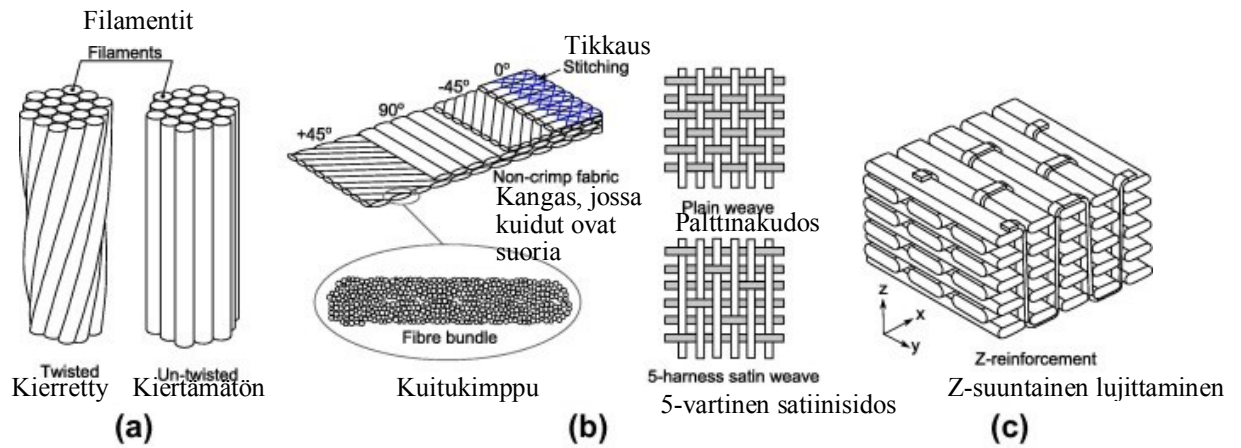
komposiiteista valmistettujen kappaleiden paino- ja kustannussäästöt ovat 15–20 % verrattuna perinteisiin alumiinista valmistettuihin kappaleisiin. [2, s. 433]



**Kuva 2.** Komposiitin lujuusominaisuudet verrattuna pelkkään kuitu- tai matriisi-materiaaliin [4].

Lujitekuidut, joita komposiiteissa käytetään, voivat olla jatkuvia tai epäjatkuvia kuituja. Käytössä on myös erilaisia jatkojalostustuotteita, kuten mattoja, kankaita ja kudoksia. Epäjatkuvat kuidut ovat lyhyitä kuituja, jotka voivat olla jauhettuja kuituja tai katkokuituja. Jauhettujen kuitujen pituus (200–300  $\mu\text{m}$ ) on huomattavasti pienempi kuin katkokuitujen (1–100 mm). Jatkuvia kuituja käytetään kuitukimppuina tai lankoina. Laskuidusta valmistetuista kierteettömistä kuitukimpuista puhutaan rovinkeina, joiden ominaisuuksia määritellään esimerkiksi tex-luvun avulla. Tex-luku ilmaisee kilometrin mittaisen kuidun painon grammoina. Hiilikuidusta valmistettujen hiilikuitutouvien ominaisuuksista puhutaan filamenttilukujen avulla. Esimerkiksi 24 000 filamenttia sisältävän touvin filamenttiluku voidaan ilmaista myös lyhenteellä 24K. [2, s. 123–127] Kuvassa 3 on erilaisia lujitteita 1D-, 2D- ja 3D-muodossa. Kuvassa 3 on esitetty 1D, 2D ja 3D lujitteita, joissa dimensio viittaa merkittävästi lujitettujen suuntien lukumäärään. Kuvassa 3b oleva NCF (non-crimp fabric) tarkoittaa kangasta, jossa kuidut ovat suoria.





**Kuva 3.** Kaaviokuvat erilaisista lujiteaihioista. (a) 1D, kuitukimppu, rovinki, (b) 2D, kankaat: NCF ja kudokset, (c) 3D, z-suuntainen lujittaminen. [6]

Mattojen ja pintahuopien tapauksessa käytetyt kuidut ovat satunnaisesti suuntautuneet ja niiden suuntautuneisuus on vähäistä. Pintahuovat valmistetaan katkokuiduista, mutta mattoihin voidaan käyttää katkokuituja tai jatkuvia kuituja erikseen tai molempia yhdessä. Kudotuissa kankaissa eli kudoksissa käytetään toisiaan kohtisuorassa olevia lankoja, jotka risteilevät toistensa yli ja ali. Eri suunnissa olevilla kuiduilla voi olla erilaiset ominaisuudet, mikä vaikuttaa tuotteen lopullisiin ominaisuuksiin. Käytössä on myös moniaksaalikankaita, joissa lujitteena voi olla esimerkiksi kolme tai neljä lankajärjestelmää. Nämä lankajärjestelmät voivat olla suuntautuneita esimerkiksi  $0^\circ/+45^\circ/-45^\circ$ :n ja  $0^\circ/+45^\circ/+90^\circ/-45^\circ$ :n kulmissa. [2, s. 127–130]

Rakenteelliset komposiitit voidaan jakaa laminaatteihin ja kerroslevyihin. Laminaateissa rakenne koostuu kaksikulotteisista levyistä tai paneeleista, joita pakataan päällekkäin. Lujitteet voi olla suunnattu samaan suuntaan, jolloin puhutaan yhdensuuntaislaminaatista, tai kohtisuoraan, jolloin puhutaan ristikkäislaminaatista. Kerroslevylaminaatissa kahden pintalevyn väliin liimataan kevyt ydinaine. Pintalevy on usein jäykkää ja vahvaa materiaalia, esimerkiksi alumiinia. Ydinaine puolestaan on kevyttä, ja sillä on matala kimmo-moduuli, esimerkiksi polymeerivaahtoa. [1, s. 660–662; 2, s. 22–23]

## 2.2. Materiaalit

Erilaisia kuitutyppejä, joita komposiittien lujittamisessa käytetään, ovat hiilikuidut, lasikuidut, aramidikuidut, luonnonkuidut ja muut kuidut, kuten boorikuidut ja korkeatiheyksinen polyetyleni. Matriisimateriaali voi muoviin lisäksi olla esimerkiksi metalli- tai mineraalimatriisi, kuten alumiini tai hiili. [1, s. 646] Tässä työssä käsiteltävien työstömenetelmien kannalta muovi on merkittävin matriisimateriaali. Matriisimuovina voidaan käyttää kesto- tai kertamuovia [1, s. 650]. Kertamuovit kovettuvat ristikilloittumalla, ja kovettumiseen vaikuttavat hartsisysteemin koostumus, lämpötila, sekoittaminen ja

lämmönsiirtyminen [5]. Ristisilloittumattomat kestopuovut sulavat korkeassa lämpötilassa ja molekyylien väliset voimat heikkenevät. Lämpötilan laskiessa taas molekyyliä yhdessä pitävät voimat vahvistuvat. [2, s. 18] Komposiiteissa käytettäviä kertamuoveja ovat muun muassa polyimidit, polyesterit ja epoksi. Kestomuovimateriaaleja, joita komposiiteissa käytetään, ovat puolestaan esimerkiksi polykarbonaatit, polyeetterieetteriketoni (PEEK) ja polyeetteri-imidi. [5]

Partikkelilujittamista käytetään komposiittien valmistuksessa esimerkiksi lujittamaan metalleja. Dispersiolujitetuissa komposiiteissa metallimatriisiin lisätään pieniä, kovia, kulutusta kestäviä partikkeleita, jotka voivat materiaaaliltaan olla metalleja tai epämetalleja. Toinen vaihtoehto partikkelilujittamista käytettäessä on käyttää matriisiin lujittamiseen suuria partikkeleita. Esimerkiksi betonin ainesosina käytettävistä materiaaleista sementti on matriisiosa ja hiekka partikkeliosa. [1, s. 629–634]

Komposiittien valmistamisessa voidaan käyttää puolivalmisteita, joissa kaikki ainesosat on yhdistetty ennen lopullisen tuotteen valmistamista. Eräs näistä puolivalmisteryhmistä on esikyllästetyt lujitteet eli prepregit. [2, s. 20–21] Prepreg on materiaali, jossa lujitteet, esimerkiksi kuitukimput, on valmiiksi kyllästetty muovilla [6]. Tässä työssä käsitellään prepregien lisäksi myös kuivia lujitteita, joilla tarkoitetaan esimerkiksi hiili- tai lasikuitua, jota ei ole esikyllästetty eli impregnoitu, vaan kuidut on toiselta puolelta päällystetty kiinnitysaineella ja toisella puolella on verkkomainen tukirakenne [7].

### 2.3. Valmistusmenetelmät

Komposiittien valmistusmenetelmät voidaan jakaa muun muassa laminointiin, puristusmenetelmiin, injektointiin, suolakemenetelmiin ja valssaukseen. Erilaisia laminointimenetelmiä ovat ruiskulaminointi, kuitukelaus ja käsinlaminointi, joka voidaan jakaa märkalaminointiin ja kuivalaminointiin eli prepreglaminointiin. Puristusmenetelmiä ovat siirtopuristus ja ahtopuristus, joka voidaan jakaa kylmäpuristukseen ja kuuma- puristukseen. Erilaisia injektio menetelmiä ovat kalvoinjektio, alipaineinjektio, paine- injektio, reaktiovalu, ruiskuvalu ja keskipakovalu. Pultrusio ja ekstrusio kuuluvat suolakemenetelmiin. [2] Näiden valmistusmenetelmien lisäksi käytössä ovat tässä työssä käsiteltävät automatisoidut valmistusmenetelmät automated tape placement (ATL) ja automated fiber placement (AFP), mutta näihin valmistusmenetelmiin tarvittavia laitteita ei maailmanlaajuisestikaan ole vielä käytössä kuin noin parisataa [5].

Monet komposiittien valmistusmenetelmistä vaativat aikaa vievää käsityötä, joten automatisoidut valmistusmenetelmät tuovat paljon etua komposiittituotteiden valmistukseen verrattuna perinteisiin komposiittien valmistusmenetelmiin. Varsinkin lujitteiden asettelu eli lay-up-vaihe vie aikaa, joten tämän vaiheen automatisointi tuo sekä ajallista että rahallista säästöä. Eri valmistusmenetelmiä käytetään erilaisten teknisten vaatimusten takia erilaisiin käyttökohteisiin. Myös menetelmän taloudellisuus vaikuttaa, vaikka valmistusmenetelmien vertailu voi olla hankalaa, koska muuttujia on niin paljon. Muun muassa

kappaleen sarjatuotannon määrä, kappaleen mitat ja laatuvaatimukset sekä muottivaatimukset on osattava ottaa huomioon. [2, s. 192–198]

### 3. AUTOMATISOIDUT KOMPOSIITTIIEN VALMISTUSMENETELMÄT

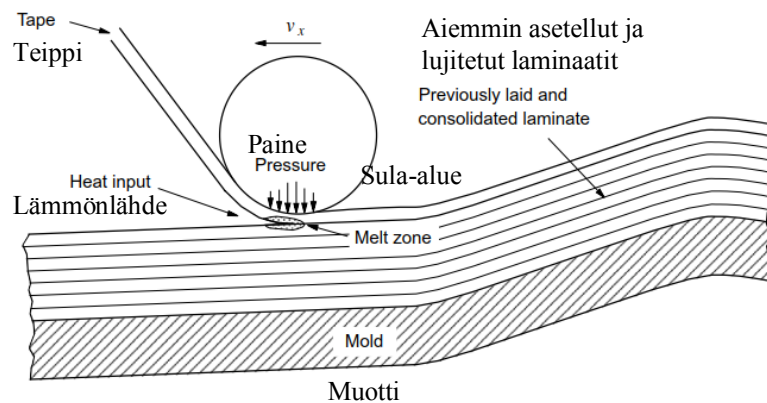
Komposiitteja voidaan valmistaa joko manuaalisesti käsin tai automatisoidusti. Nykyään on kehitetty yhä enemmän automaatioon perustuvia valmistustapoja, koska niiden avulla valmistuskustannukset saadaan pienemmiksi, tuotantonopeus suuremmaksi ja tuotteiden laatu yhdenmukaiseksi. Ihmistyövoiman ja käsityön määrän väheneminen on yksi automatisoitujen menetelmien vaikutuksia ja tämä vaikuttaa esimerkiksi tuotteiden laadun yhdenmukaistumiseen. Automatisoitujen valmistusmenetelmien hyödyt saavutetaan erityisesti sarjatuotannossa, koska paljon pääomaa sitoutuu kalliin valmistuslaitteen hankintaan. Säästöjä saadaan, kun kustannukset pienenevät esimerkiksi pienentyneen materiaalihävikin ansiosta. Automatisoidussa valmistuksessa lujitteen asettelun virheet ja materiaalihukka vähenevät verrattuna käsityöhön. Automatisaatio myös mahdollistaa suunnittelun vapauden eli monimutkaisen kuituorientaation hahmottelun tietokoneella ja suunnitelman toteuttamisen automaattisen asettelun avulla. Kuituorientaation suunnitellulla tuotteiden mekaaniset ominaisuudet saadaan paremmaksi. Tämänhetkisiä ongelmia automatisoiduissa valmistus-tavoissa ovat matalat tuotantonopeudet ja laatu-ongelmat. Esimerkiksi jäännösjännitykset voivat huonontaa tuotteen laatua. [5, 8-10]

Kaksi automatisoitua komposiittien valmistustapaa ovat ATL- ja AFP-menetelmät, jotka eroavat toisistaan lujitteen leveyden mukaan. Kuituja (fiber) lujitteena käyttävässä valmistustavassa kuidut ovat kapeampi kuin teippiä (tape) käyttävässä. Kuitulujittamisessa voi kapeiden kuitukimppujen leveys voi olla esimerkiksi 3 mm, 6 mm tai 12 mm. Nauhalujittamisessa leveiden teippien leveys on usein 75 mm, 150 mm tai 300 mm. Lujitteena näissä menetelmissä voidaan käyttää esimerkiksi yhdensuuntaislujitettua prepregiä. [5, 9, 11]

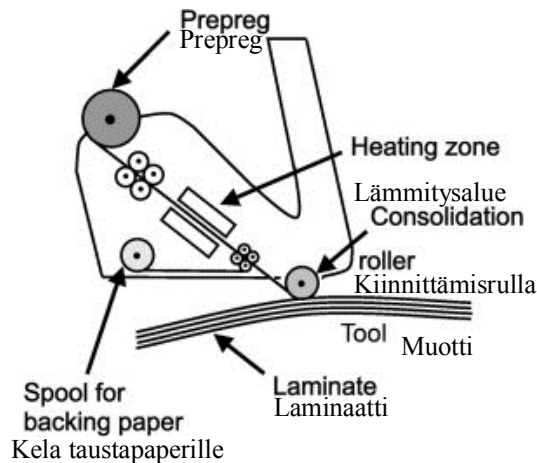
ATL- ja AFP-laitteistoja verratessa suurimmat erot ovat siis lujitemateriaalin leveys ja valmiiden tuotteiden ominaisuudet. Lisäksi erona on se, että ATL:ssa voidaan yhtä aikaa levittää yhtä tai useampaa leveää teippiä kun taas AFP:ssa lujitteita voidaan jopa leikata, jotta saadaan riittävän kapea materiaali haluttuun kohtaan tuotetta. AFP:ssakin on mahdollisuus levittää useampaa kuitukimppua kerralla. ATL:lla valmistetaan yksinkertaisempia tuotteita, joissa ei ole liian kaarevia ja monimutkaisia kohtia. AFP:lla sen sijaan on mahdollista valmistaa kaksoiskaarevia tuotteita ja monimutkaisempiakin geometrioita. [10]

### 3.1. Automatisoitu nauhalaminointi (ATL)

ATL-laitteissa voidaan käyttää prepregejä, kuten muissakin komposiittien valmistusmenetelmissä. Prepregit tuottavat useimmiten parhaan lopputuotteen. Prepregin ominaisuuksia voidaan muokata niin, että se soveltuu automatisoituihin valmistusmenetelmiin. Esimerkiksi prepregin taustapaperi (backing paper) voidaan vaihtaa tai prepregin kyllästysastetta voidaan muuttaa. [9] Prepregien lisäksi valmistuksessa voidaan käyttää kuivia lujitteita eli esimerkiksi erilaisia hiilikuitu- tai lasikuitukimppuja, vaikka prepreg-teipit ovatkin tällä hetkellä yleisemmässä käytössä [7].



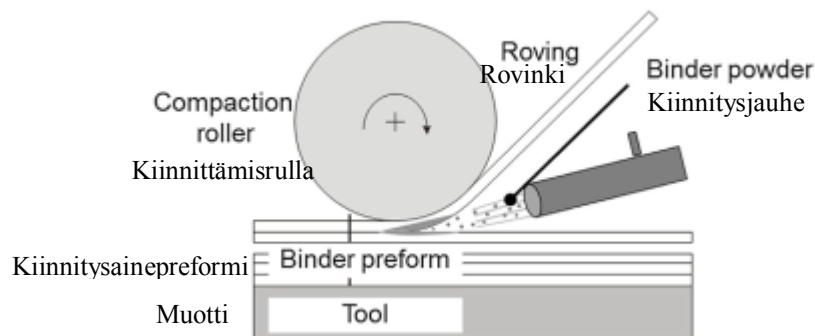
**Kuva 4.** Havainnekuva ATL-valmistusmenetelmästä [5].



**Kuva 5.** Prepregiä levittävä ATL-laite [13].

Kuvassa 4 on ATL-menetelmän valmistuksen periaatekuva ja kuvassa 5 ATL-laitteen lujitteen asetteluun tarkoitetun pään osat. Kuvassa 4 nähdään, miten prepreg-teippi on varastoitu laitteen sisälle, josta se kuvien 4 ja 5 mukaisesti asetetaan paineen ja lämmön avulla haluttuun alustaan tai muottiin kiinni. Prosessin alussa vaadittu määrä prepreg-teippiä yleensä kiinnitetään työkaluun silikonitelalla. Lay-up- eli laminointivaiheessa

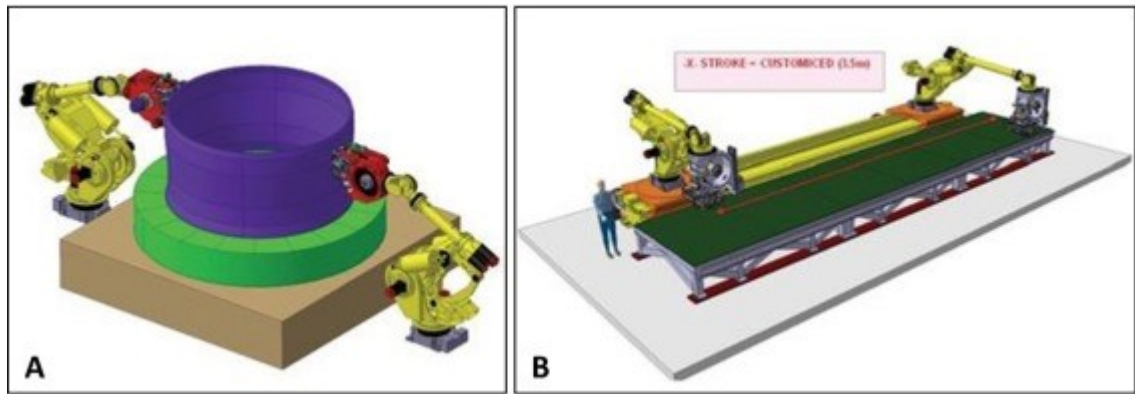
teippi kiinnittyy materiaaliin esimerkiksi silikonitelaan kohdistettavan paineen avulla. Prepreg-teippiä voidaan lämmittää kuumennusyksiköllä laserin tai kaasun (hot gas torch) avulla joko laminointipään edessä tai samaan aikaan laminointilaitteen sisällä teippiä kuljetettaessa. Teipin taustapaperi irrotetaan ennen laminointivaihetta. Teippiin kohdistetaan esimerkiksi joko telalla tai niin sanotulla laying shoe:lla paine, jota pystytään säätämään halutun lopputuloksen saamiseksi. Laitteiston saavuttaessa muotin tai valmistuvan kappaleen rajan, leikataan teippi poikki ja leikatun teipin loppupää kiinnitetään muottiin ennen uuden kerroksen tai rivin toistamista. Teippi voidaan katkaista esimerkiksi pyörivällä tai leikkaavalla terällä. [8, 9]



**Kuva 6.** Kuivaa lujitetta levittävän AFP-laitteen havainnekuva [10].

Kuivaa lujitetta käytettäessä ei teippiä tai kuitua pystytä kiinnittämään muottiin samalla tavalla kuin prepregiä. Sen sijaan kuivaan lujitteeseen on jossain vaiheessa prosessointia lisättävä kiinnitysainetta. Kuvassa 6 on esitetty AFP-laitteen kaaviokuva, jossa kuivan lujitteen ja muotin tai edellisen kerroksen väliin lisätään jauhemaista kiinnitysainetta. [12] Samalla periaatteella toimii myös ATL, mutta siinä kuvassa 6 näkyvän rovingin sijaan levitettäisiin leveää lujitetta, esimerkiksi kangasta, jonka alle kiinnitysaine levitetään.

Varsinainen laitteisto, jolla teippiä levitetään muottiin voi olla robottikäsimäinen (robotic arm) tai portaalinainen (gantry), joka puolestaan voi olla toteutettu horisontaalisesti tai vertikaalisesti. Omaksi laitteistotyyppikseen voidaan mainita myös sarakeittain tai rivistöittäin kulkeva, joka voidaan lukea myös portaalimaiseksi rakenteeksi. Tyypillisesti ATL:ssa käytetään pystysuoraa rivissä kulkevaa tai vaakasuorassa kulkevaa portaalimaista laitteistoa. [9, 13] Kuvassa 7A on kaksi robottikäsimäistä levityspäätä sisältävä ATL-laitteisto ja kuvassa 7B pieni portaalimainen laitteisto.



**Kuva 7.** A) MTorresin robottikäsimäinen ATL-laitteisto, B) MTorresin pieni portaali-mainen ATL-laitteisto [6].

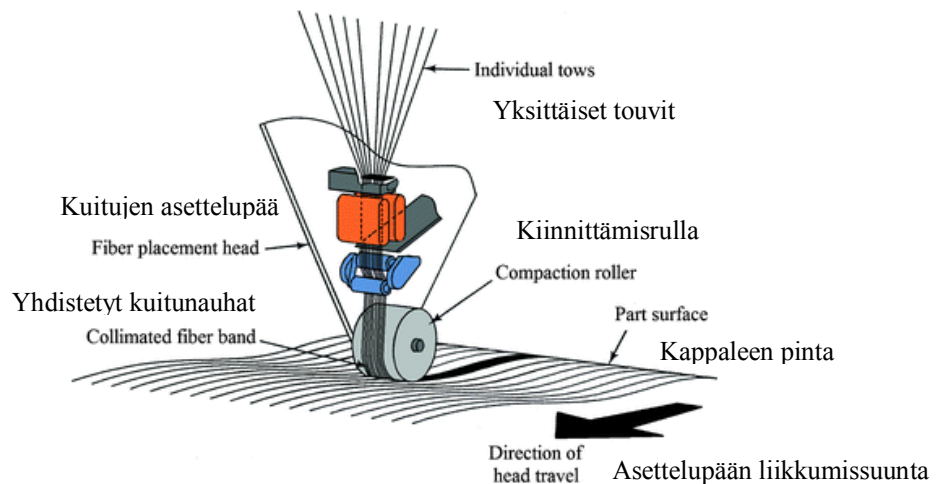
ATL –menetelmässä käytetään leveitä teippejä, mikä rajoittaa valmiin tuotteen ominaisuuksia. Teipin leveys ATL-valmistuksessa on 75 mm, 150 mm tai 300 mm. Valmistettava tuote ei saa olla liian monimutkainen eli esimerkiksi sen kaarevuus on rajoitettu. Kaarevuussäteen ollessa liian pieni voi tapahtua teipin rypistymistä, mikä heikentää valmiin tuotteen mekaanisia ominaisuuksia. [11, 14] Sallitulle kaarevuussäteelle on laskettu ja tutkittu erilaisia arvoja. Esimerkiksi Wiehn ja Halen mukaan 150 mm leveälle teipille vaadittu kaarevuussäde on 610 cm, mutta tuotteen kaarevuussäteen voidaan vaatia olevan jopa yli 10 m. [15, katso 9]

Tuotantonopeus ATL:lla suurempi kuin AFP:lla, koska lujitteena käytetty teippi on leveämpää [11, 14]. Yleensä lineaarisesti levitysnopeudeksi esitetään korkeintaan 1 m/s, joka on samaa luokkaa kuin AFP:lla. Kun otetaan huomioon leveämpi materiaali voi vertailu olla järkevää suorittaa materiaalin painon mukaan. On esitetty, että ATL:lla voi teoreettisesti levittää jopa 100 kg/h, mutta käytännössä yksinkertaisillekin muodoille levitysnopeudeksi saadaan 25-50 kg/h. Monimutkaisille tuotteille levitysnopeus voi pudota jopa 12 kg/h:ssa. [16] Toisaalta teoreettisilla laskelmilla on AFP:n osoitettu oleva tuottoisampi kuin ATL:n, etenkin pieniä kappaleita valmistettaessa. Mutta tämänhetkiset käytössä olevat AFP- tai ATL-laitteet eivät pysty tuottamaan kappaleita läheskään yhtä nopeasti kuin matemaattiset mallit antavat olettaa. Tämä johtuu muun muassa valmiiden kappaleiden monimutkaisista muodoista, materiaalin lisäyksestä laitteeseen ja laatuongelmista. ATL-laitteistoja valmistavat esimerkiksi MAG IAS (Saksa), MTorres (Espanja), GFM (Yhdysvallat) ja Mikrosam (Makedonia). [9]

### 3.2. Automatisoitu kuitulaminointi (AFP)

AFP –menetelmässä käytetään kapeita lujitteita eli se soveltuu ATL:a paremmin erittäin tehokkaaseen tuotantoon ja vaikeampia tai monimutkaisempia kaarevia osia sisältävien

tuotteiden valmistukseen [5, 11]. AFP-menetelmä on kehitetty ATL-menetelmästä 1970-80-luvuilla siten, että ATL:ssa käytetty leveä teippi leikattiin kapeammaksi. Kaupalliseen käyttöön laitteet tulivat 1980-luvun loppupuolella. AFP-menetelmän kaupallisessa kehityksessä hyödynnettiin ATL- ja kuitukelausprosessia. [9] Kuitukelausta voidaan siis myös pitää valmistusprosessina, josta AFP-valmistus on kehittynyt. Erona kuitukelaukseen on, että AFP:ssa valmistus voi tapahtua myös kuperille pinnoille. [17] Kapeat lujitteet, joita AFP:ssa käytetään, koostuvat kuitutouveista, jotka on impregnoitu esimerkiksi epoksihartsiin. Jokainen touvi voi olla 3 mm leveä kuitukimppu (strand), joka koostuu jatkuvista kuiduista. Tällainen kuitukimppu voi koostua useista tuhansista, esimerkiksi 12 000, yksittäisestä filamenttisäikeestä. Valmistuksen aikana touvit yhdistetään levityspäässä ja näin saadaan aikaan yksi nauha tai teippi, kuten kuvassa 8 esitetään. [10, s. 144] Filamenttisäikeet ovat yksittäisiä kuituja, rovingit yhdensuuntaisia lasikuitukimppuja ja touvit yhdensuuntaisia hiilikuitukimppuja. Käytössä on paljon erilaisia nimityksiä käytettäville lujitteille. Eräs näistä on towpreg, jonka esimerkiksi Compositence (Saksa) rajaa jatkuvaksi prepregiksi, jolla on erityisen korkea filamenttiluku. [18] AFP:ssa käytettävästä lujitemateriaalista käytetään yleisesti nimitystä teippi (tape), vaikka voisi olla parempi puhua touveista tai kuitukimpuista [7].



**Kuva 8.** AFP-laite, jossa tuotteeseen levitetään yhtäaikaaisesti 10 touvia [10].

Kuvassa 8 havainnollistetaan, miten AFP-laitteella voidaan samanaikaisesti kiinnittää useita touveja tai teippejä haluttuun alustaan tai muottiin. Verrattuna ATL-laitteiston periaatekuvaan (kuva 4), tässä levitettävät lujitteet (rullat, kehiöt) eivät ole levityspään sisällä, vaan lujite tuodaan levityspäähän erillisestä kehiötelineestä.

AFP-laitteita on kahdenlaisia, kuten ATL-laitteitakin, eli ne ovat joko robottikäsimäisiä tai portaalimaista. Muun muassa Coriolis Composites (Ranska) ja Electroimpact (Iso-Britannia) toimittavat kumpaakin versiota AFP-laitteesta, kun taas esimerkiksi MTorres



käyttää myös portaalimaista laitteistoa. Robottikäsimäinen laitteisto laskee investoinnin hintaa eli ne ovat halvempia kuin portaalimaiset laitteistot. [6] Kesto- tai kertamuovisen prepreg-teipin esilämmitykseen voidaan käyttää infrapunalämmitintä, laserlämmitintä tai kaasupoltinta, ja myös ultraäänilämmityksen käyttöä on tutkittu. [19]

AFP:ssa voidaan samalla kertaa kuljettaa useita teippejä tai touveja rinnakkain [9]. Esimerkiksi MTorresin TorresFiberLayUp-laitteella voidaan samanaikaisesti levittää 12, 16, 24 tai 32 touvia [20]. Näin saadaan tuotantonopeutta suuremmaksi, koska kerralla pystytään asettelemaan leveämpää lujitetta suuremmalle pinta-alalle.

Lujitteen asettelun nopeudella ja kiihtyvyydellä on suurempi vaikutus lopulliseen tuotantonopeuteen monimutkaisilla tuotteilla [21]. AFP:lla on mahdollista valmistaa jyrkempiä kaarroksia eli taivuttaa lujitetta pienellä kaarevuussäteellä ja valmistaa kaksoiskaarevia tuotteita [9]. Tuotantonopeudella ja valmistuksen aikana tapahtuvilla lujitetta levittävän pään kiihdytyksillä on siis suurempi vaikutus AFP:ssa kuin ATL:ssa, jossa valmistetaan yksinkertaisempia tuotteita kuin AFP:ssa.

Electroimpact ja Coriolis esittävät omien AFP-laitteidensa tuotantonopeudeksi hieman alle 1 m/s, Ingersollin (Yhdysvallat) laitteen tuotantonopeus puolestaan on 1 m/s [13, 22, 23]. Tämä yhtä suuri levitysnopeus verrattuna ATL:iin voi johtua siitä, että tällä maksiminopeudella on mahdollista valmistaa vain yksinkertaisia kappaleita. Monimutkaisille kappaleille voi lujitteen levitysnopeus poiketa merkittävästi valmistajan ilmoittamista maksiminopeuksista.

Toisaalta tuotantonopeus voidaan ilmoittaa myös kiloina tunnissa. AFP:lla on valmistettu lentokoneenosia tuotantonopeudella 8,6 kg/h. [9] Teoreettisesti tuotantonopeus voi olla jopa 40 kg/h. [16] MTorres:lla on laitteisto, jossa voidaan yhtä aikaa käyttää sekä leveää että kapeaa lujitetta [24]. Toisaalta Electroimpact on kehittänyt robotin, johon voidaan vaihtaa lujitetta levittävä pää. Näin on mahdollista pelkällä laitteiston pään vaihdolla käyttää sekä leveää että kapeaa lujitemateriaalia. Valmistajan mukaan tähän pään vaihtamiseen menee kokonaisuudessaan 90 sekuntia. Laitteiston pään nopea vaihtaminen vähentää myös laitteen seisokkiaikaa lujitteen loppuessa levityspäästä. [25] Myös Mikrosam valmistaa laitteistoa, jossa vaihdettavan pään avulla on mahdollista levittää joko kapeaa tai leveää lujitetta eli se yhdistää ATL:n ja AFP:n [26]. Toisaalta sama valmistaja on kehittänyt laitteiston, jossa on viisi vaihdettavaa päätä. ATL:n ja AFP:n lisäksi kyseisellä laitteella on mahdollisuus käyttää kuitukelausta, prepregin valmistusta sekä prepregin leikkausta ja kelausta. [27]

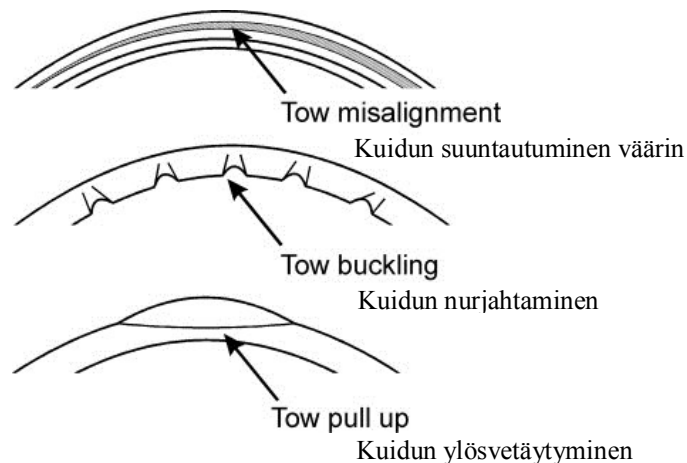
*Taulukko 1. ATL:n ja AFP:n ominaisuuksien vertailu.*

	ATL	AFP
<b>Lujitteen leveys (mm)</b>	75, 150, 300	3,2; 6,4; 12,7
<b>Rinnakkaisten lujitteiden lukumäärä</b>	1-4	1-32
<b>Materiaalin säilytys</b>	Levityspään sisällä	Levityspään sisällä tai erillisessä tilassa
<b>Tyypillinen laminointinopeus</b>	~1 m/s < 100 kg/h (teoreettinen maksimi)	< 1 m/s < 40 kg/h (teoreettinen maksimi)
<b>Pienin kaarevuussäde</b>	610 cm 150 mm leveälle teipille	50,8 cm, lujitteen leveyttä ei ilmoitettu

Taulukkoon 1 on koottu yhteenvetona aiemmin esitellyjä ATL:n ja AFP:n ominaisuuksia. Suurin periaatteellinen ero valmistusmenetelmien välillä on lujitteen leveys. Eri valmistajilla on erilaisia laitteistoja, jotka saattavat erota toisistaan hyvinkin paljon. Tämän vuoksi ei kaikkia valmistajien ilmoittamia parametreja ole järkevää vertailla tarkasteltaessa ATL- ja AFP-prosesseja yleisesti.

### 3.3. ATL- ja AFP -valmistuksen prosessiparametrit

Jotta valmistettava tuote vastaa suunniteltua tuotetta, tehdään CAD-ohjelmalla malli, jota ATL tai AFP-laitteisto noudattaa. Mitä enemmän seurattavia datapisteitä malliin tehdään, sitä tarkempi lujitteen asettelu on. Liiallinen datapisteiden määrä saattaa aiheuttaa sen, että asettelupää (placement head) joutuu hidastamaan ja kiihdyttämään turhaan valmistusprosessin aikana, jotta se pystyy seuraamaan ohjelmoitua rataa. Toisaalta liian pieni määrä datapisteitä heikentää valmiin tuotteen laatua, koska kiinnitettävä lujitteen ei välttämättä kiinnity haluttuun kohtaan. [9]



**Kuva 9.** Yleisimmät kuidun tai teipin levityksen aikana tuotteeseen muodostuvat virheet [9].

ATL- ja AFP-prosessissa on kolme kuidun tai teipin ohjaamiseen liittyvää vikatyyppeä, kuidun nurjahtaminen (tow buckling), kuidun ylösvetäytyminen (tow pull up) ja kuidun suuntautuminen väärin (tow misalignment). Kuvassa 9 on esitetty erilaiset vikatyypit. Harvinaisempaa on kuitujen/touvien vääntyminen. Jos valmistuksessa käytetyt ja syntyvät puristavat voimat tulevat liian suuriksi, tapahtuu nurjahtamista tai ylösvetäytymistä. Kuitujen suuntautuminen väärin voi johtua käytetystä materiaalista tai prosessinaikaisista muutoksista kuidun asettelussa. [9]

ATL:n valmistusmenetelmässä prosessiparametreina pidetään laminoinnin nopeutta, painamiseen tarvittavaa voimaa, muotin lämpötilaa ja teipin kiinnittämiseen käytettävän yksikön lämpötilaa. Laminoinnin laatuun vaikuttaa enimmäkseen laminoinnin nopeus. ATL:ssa käytettävien kestopuovi-prepregien valmistuksessa on otettava huomioon aika, joka vaaditaan kestopuovin lämpötilan nostamiseen sulamislämmön yläpuolelle, jotta prepreg kiinnittyy muottiin ja edellisiin teippikerroksiin. Tutkimuksissa on havaittu, että suurin prosessointinopeus tästä johtuen on kestopuovi-prepregeillä 3,6 – 5 m/min. [9, 28]

Lujitemateriaalin tasalaatuisuus, huokoisuus ja rajapinnan ominaisuudet vaikuttavat paljon lopullisen tuotteen laminointiin. Käytettävän materiaalin ominaisuudet vaikuttavat lopullisen tuotteen laadun lisäksi myös tuotantonopeuteen, koska huono teippimateriaali on poistettava, jotta sitä ei käytetä lopputuotteessa. Myös tarrautuvuudella (tack) on suuri merkitys. Tarrautuvuuteen vaikuttavat teipin ominaisuuksien lisäksi vallitsevat valmistusolosuhteet eli esimerkiksi asetteluun käytetty paine, teipin kiinnitysaineen tai prepregin kiinnittämiseen käytetty lämpötila tai teipin asettelunopeus. [9]

## 4. MATERIAALIT ATL- JA AFP-LAITTEILLE

Materiaalivaihtoehdot, joita ATL:ssa ja AFP:ssa voidaan hyödyntää, jaetaan kolmeen eri ryhmään. Kertamuovi-prepregit, kestopuovi-prepregit ja kuivat lujitteet ovat ominaisuuksiltaan erilaisia ja vaativat laitteilta erilaisia ominaisuuksia. Pregpreg-teipit jaetaan matriisimateriaalin perusteella kestopuoveihin ja kertamuoveihin, kun taas kuivissa lujitteissa ei ole matriisia valmiina. [29, s. 632–634]

Tässä työssä keskitytään lujitekuitujen eli esimerkiksi hiilikuidun ominaisuuksiin. Kuitenkin myös matriisimuovin ominaisuuksilla on vaikutuksia valmiin komposiittituotteen ominaisuuksiin. Kestomuovin hyvänä puolena kertamuoviin verrattuna on, että komposiiteille yleiseen jälkiprosessointiin ei ole tarvetta. Toisaalta tuotantonopeus kestopuovia käytettäessä on niin paljon heikompi kuin kertamuoveja käytettäessä, että jälkiprosessoinnissa säästetty aika ei riitä korvaamaan tuotantonopeuden hitautta. [8] Toisaalta kestopuovikomposiitit tyypillisesti kestävätkä kemikaaleja paremmin ja ovat vähemmän hauraita kuin kertamuovit, ja lisäksi niiden sitkeys sekä väsymislujuus ovat paremmat kuin kertamuoveilla [19].

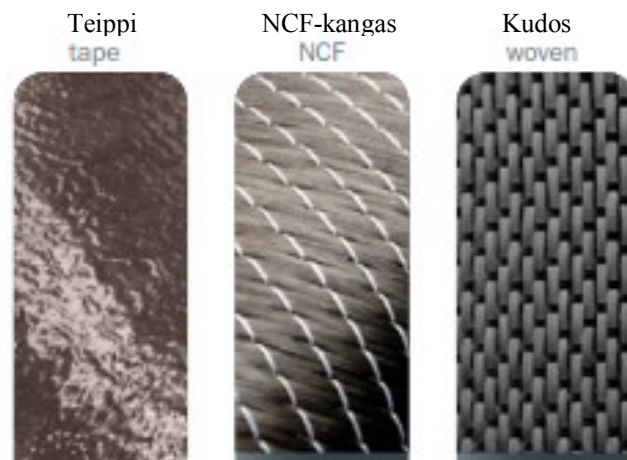
Lujitteena ATL:ssa ja AFP:ssa voidaan käyttää joko kuivaa lujitetta tai prepreg-teippiin laminoituja lujitteita. Kuivaa lujitetta käytettäessä on lujitetta levitettäessä oltava mukana 5–10 % sidosainetta, esimerkiksi liimaa. Lopullinen komposiitti valmistetaan infusoidulla kuivalla lujitepaketilla (preformi) erillisessä vaiheessa. Prepreg-teippi puolestaan kiinnittyy alustaan tai muottiin lämmön avulla. [29, s. 631–633] Prepreg-teippiä käytettäessä on otettava huomioon kustannukset, jotka aiheutuvat esi-impregroinnista, kylmäsäilytyksestä ja kovetuksesta esimerkiksi autoklaavissa. Materiaalit eivät myöskään säily varastoituna pitkiä aikoja; varastointiaika ilmoitetaan hyllyaikana (shelf life) ja työskentelyaikana (room time). Etenkin prepregillä työskentelyaika voi olla hyvin rajoitettu, maksimissaan luokkaa 20 päivää. Automatisoiduissa valmistusmenetelmissä on otettava huomioon, että niitä käytetään varsin isojen tuotteiden valmistukseen jolloin valmistusaika saattaa olla pidempi kuin kolme viikkoa. Toisaalta kuivia lujitteita käytettäessä on osattava ottaa huomioon tiettyjä rajoitteita. Kuivat lujitteet ovat vähemmän jäykkiä, jolloin ATL- tai AFP-laitteistossa käytetty jännite on pidettävä riittävän matalana. Tuotantonopeutta ei välttämättä saada niin korkeaksi kuin kertamuoveilla ja tarkkuus voi olla heikompa. [30]

### 4.1. Kuivat lujitteet

Kuivat lujitteet eli kuivat kuitukimput vaativat kiinnityksineen, jotta kuidut pysyvät valmistuksessa stabiileina. Tähän tarkoitukseen voidaan käyttää kertamuovista tai kestopuovista valmistettua jauhemaista kiinnityksainetta. Teipin tai muun lujitteen pinnalla

oleva kiinnitysaine on aktivoitava, jotta teipit tarrautuvat toisiinsa komposiittia valmistettaessa. Tähän tarvitaan lämpöä ja painetta. [29, s. 633–634] Toisaalta kuivaa lujitetta levitettäessä voidaan kiinnitysaine esimerkiksi suihkuttaa lujitekerrosten väliin [17]. Erilaisilla materiaaleilla on erilaiset lämpötila- ja painevaatimukset. Kiinnitysaineen aktivointiin voidaan käyttää kaasupoltinta, mutta parempi laminointinopeus saadaan laserin avulla. Kuivien lujitteiden huonona puolena prosessointinäkökulmasta pidetään sitä, että valmistuksen aikana muodostuu lyhyitä hiilikuituirtopaloja, joita on poistettava jatkuvasti. [29, s. 633–634]

Kuivia lujitteita valmistettaessa ja käytettäessä suuri kuitujen määrä parantaa materiaalin mekaanisia ominaisuuksia. Toisaalta samalla se heikentää materiaalin läpäisevyyttä ja sitä kautta prosessoitavuus heikkenee. [17]



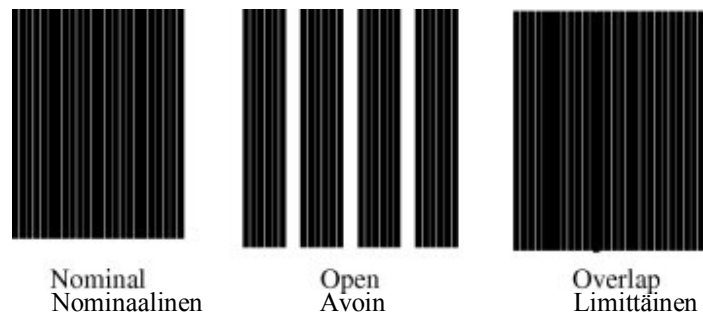
**Kuva 10.** Erilaisia kuivia lujiterakenteita ovat teippi, kangas ja kudoks [31].

Kuivia lujitteita voidaan käyttää kuituina, kudoksina tai kankaina. Kuvassa 10 on kuvat teippi-, NCF-kangas- ja kudosmateriaaleista. Näillä materiaaleilla on erilaiset läpäisevyysominaisuudet. NCF-kankaassa ja kudoksissa on keskikokoisia virtauskanavia (meso flow channel), joiden läpäisevyys on suurempi kuin teipin yksittäisten kuitujen välisten mikrokokoisten virtauskanavien (micro flow channel). Läpäisevyys vaikuttaa impregnaation kautta materiaalin prosessoitavuuteen. Läpäisevyysarvojen on oltava riittävän suuria, jotta valmistus ylipäättään onnistuu. [12]

Rimmel *et al.* tutkivat miten kuivan lujitteen läpäisevyyteen vaikuttavat kiinnitysaineen määrä ja sen partikkelikoon suurentaminen, lujitteen laminoinnin järjestyksen muuttaminen, siten että materiaaliin tulee aaltomaisuutta, sekä virtauskanavien määrän lisääminen tuftaamalla. Kaikki menetelmät paransivat läpäisevyyttä, mutta eniten vaikutti tuftaus. Tuftaus nosti läpäisevyyttä lähes 30-kertaiseksi, kun laminoinnin järjestyksen muuttamisen vaikutus oli noin 1,4-kertainen. [12]

#### 4.1.1. Hiilikuitu

Belhaj *et al.* tutkivat kuivan hiilikuitulujitteen permeabiliteettia sekä elastista ja plastista myötymää. Tutkimuksessa muodostettiin kolme erilaista mallia, joissa hiilikuidun asettelu vaihteli. Nominaalisessa mallissa (nominal) kuidut olivat toistensa vieressä ilman päällekkäisyyksiä tai rakoja. Avoimessa mallissa (open) joka viidennen kuidun välissä oli 2 mm aukko ja limittäisessä mallissa (overlap) joka viides kuitu oli päällekkäin 2 mm verran. Kuvassa 11 on esitetty eri mallien topologiat. [17]



**Kuva 11.** Belhaj *et al.* tutkimien hiilikuitulujitteiden topologiat [17].

Belhaj'n tutkimusryhmä tutki hiilikuitupreformien ominaisuuksia Zwickin puristuskokeen avulla. Näytteitä puristettiin nopeudella 0,5 mm/min aina 90 kN asti. Tuloksena havaittiin, että paksuimman preformin, limittäisen mallin, hiilikuitupitoisuus oli suurin. Tutkimuksessa havaittiin myös, että avoimeen malliin tulee suurempi plastinen muodonmuutos kuin kahdessa muussa mallissa. Tämä vaikuttaa ATL-prosessoinnissa siihen, miten preformin ominaisuudet eri kerroksissa vaihtelevat. Alimpiin kerroksiin tulee suurempi plastinen muodonmuutos kuin päälle liimattaviin kerroksiin. Avoimessa mallissa kuidut saattavat orientoitua uudelleen prosessoinnin aikana eli kuituja saattaa liikkua matalan kuitupitoisuuden alueelle. Uudelleenjärjestäytymisen jälkeen kuitujen liikkuminen on rajoittuneempaa mikä johtaa matalampaan plastisuuteen. Käytössä olevissa ATL- ja AFP-laitteissa on mahdollista tehdä laaduntarkkailua kuitua levittävän rullan mittaaman paineen avulla. Tällaisen puristustestin avulla voidaan valmistuksen aikana vaikuttaa kuitujen välisiin rakoihin ja välillisesti myös lopulliseen kuitutiheyteen ja preformin paksuuteen. Näin ollen laaduntarkkailulle olisi olemassa mekaaninen tutkimus eikä laadunvalvontaa tarvitse perustaa ainoastaan optiseen tarkasteluun. [17]

Veldenz *et al.* tutkivat markkinoilla olevien hiilikuitulujitteiden ominaisuuksia Coriolis Composites:n AFP-laitteella tuotantonopeudella 400 mm/s. Lämmönlähteenä tutkimuksessa oli 3 kW diodilaser, joka tuotti 200–300 °C:n lämpötilan kiinnitysaineen aktivointia varten. Laserin antama teho eri näytteiden kohdalla oli 549–738 W. Tutkimuksen tarkoituksena oli havainnoida materiaalien prosessoitavuutta. Tuloksina havaittiin, että mitä

korkeampi hiilikuidun paino pinta-alayksikköä kohden oli, sitä vähemmän lopullisessa tuotteessa oli virheitä. Virheiksi tutkimuksessa huomioitiin muun muassa kuidun haituvat, pinnalla olevat irtokuidut, touvin kiertyminen, kuidun poimuttuminen, limittyminen ja yli 2 mm rako. [21]

Tutkimuksessa infuusioaikoja verrattiin HexForce 48330 QB1200 UD- eli yhden-suuntaiseen kudokseen. Tutkittujen materiaalien infuusioajat olivat moninkertaiset verrokkimateriaaliin verrattuna eli tutkittujen materiaalien valmistaminen on hitaampaa kuin verrokkimateriaalin. Tutkittujen näytteiden joukossa olleen nopeimman infuusioajan oletettiin johtuvan siitä, että erotuksena muista materiaaleista vain toisella puolella oli kiinnitysainetta, toisen puolen ollessa hiilestä valmistettu pintamatto (veil). Tämä pintamatto saa aikaan hyvän läpäisevyyden kerrosten välillä. Kyseisen näytteen toinen puoli oli jauhemaista kiinnitysainetta, kun taas kolmeen näytteeseen oli levitetty jauhe- maista kiinnitysainetta molemmille puolille teippiä. Viidennessä näytteessä oli kiinnitys- ainetta sisältänyt kestopuovinen pintamatto näytteen molemmilla puolilla. [21]

Komposiittien valmistuksessa halutaan tehdä myös monimutkaisia muotoja jolloin lujit- teiden asettelussa esimerkiksi ATL:ssa ja AFP:ssa on jokin tietty pienin kaarevuussäde. Kaarevuussäde saattaa vaikuttaa valmistuksessa muodostuviin laatuvirheisiin. Matveev *et al.* yrittivät kehittää matemaattista mallia siitä, miten kuivien lujitteiden asettelu onnis- tuu AFP:lla. Tutkimuksessa käytettiin Coriolis Composites:n AFP-laitteistoa, jossa kah- deksan leveydeltään 6,35 mm:n teippiä asetellaan kerralla. Erilaisia kokeita suoritettiin 24 K hiilikuituteipillä, jonka toisella puolella oli kestopuovisidosaine ja toisella puolella lasikuituinen pintamatto. Materiaalin neliöpaino oli  $194 \text{ g/m}^2$ . Hiilikuitutouvit aseteltiin kolmeen kerrokseen ( $90^\circ/0^\circ/90^\circ$ ) ja tutkimuksessa käytettiin kuutta erilaista kaarevuus- sädettä. Nämä olivat 1,5m, 1,2m, 0,9m, 0,7m, 0,5m ja 0,4 m. Teippiin kohdistettiin telalla 200 N voima  $250^\circ\text{C}$ :ssa, tuotantonopeuden ollessa 1 m/s. Tutkimuksen käytännön osuu- dessa havaittiin, että mitä pienempi kaarevuussäde oli, sitä tiheämmin virheitä lopulli- sessa tuotteessa oli. Teoreettisessa mallissa käytettiin jäykkyysindeksiä, jonka avulla pys- tytään laskemaan kriittinen kaarevuussäde materiaalille. Verrattaessa kokeellista ja ma- temaattista mallia havaittiin kuitenkin, että todellisuudessa virheitä muodostuu vähem- män kuin matemaattinen malli ennustaa. Malli tosin käyttäytyy samalla tavalla kuin ko- keelliset tulokset, kaarevuussäteen kasvaessa virheitä muodostuu vähemmän. [7]

Matveev *et al.* suorittaman tutkimuksen johtopäätöksinä todettiin, että lämpötilan nosta- minen johtaa jäykkyyden eksponentiaaliseen kasvuun. Tarrautuvuuden parantaminen nostaa laminoinnin laatua. Myös paineen nostaminen ja hitaampi tuotantonopeus eli hi- taampi teipin asettelunopeus parantavat laatua. Suurin merkitys on kuitenkin lämpötilalla ja kahden muun prosessimuuttujan vaikutus laatuun on siihen verrattuna pientä. [7]

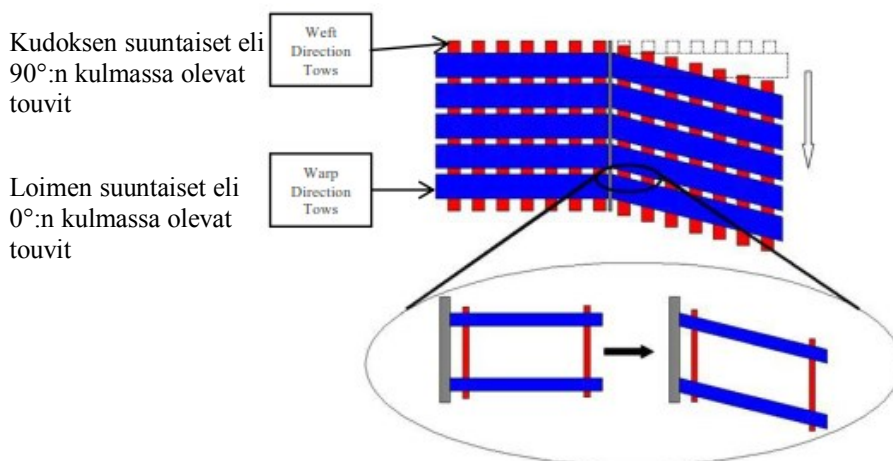
Saksalainen Voith on valmistanut AFP-laitteen (Voith Roving Applicatorin, VRA), jonka avulla voidaan käyttää 50 mm leveitä kuivia hiilikuituteippejä. Laitteiston avulla voidaan

asettaa yhtäaikaaisesti 4 teippiä ja valmistaa 2D-multiakksiaalipreformeja. Valmistajan mukaan teipit voidaan asettaa mihin kulmaan tahansa. Näin valmistuvien lähes mitta-valmiiden preformien (near-net-shaped preforms) avulla on valmistettu osia Audin autoihin. VRA:ssa käytetään jatkuvaa hiilikuitua, kun taas saman valmistajan Voith Long-Fiber Preformer –laitteella valmistetaan pitkistä hiilikuiduista komposiittirakenteita. Kyseisessä laitteessa rovingit tulevat kerästä paikallaan olevasta yksiköstä ja rovingit käsitellään asettelupään sisällä. [32, 33]

#### 4.1.2. Lasikuitu

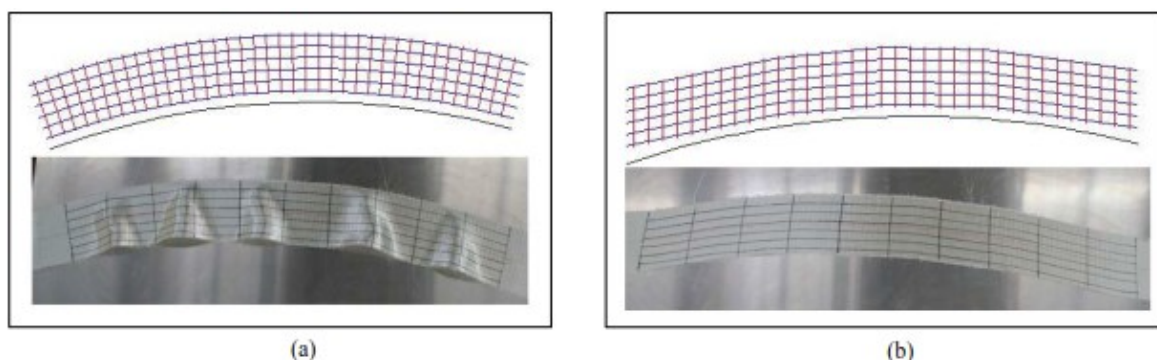
NCF-kankaita hyödyntävää automatisoitua valmistusmenetelmää, shifting-menetelmässä, on kehitetty viime vuosina. Esimerkiksi lasikuitukangasta käytettäessä, on tämän valmistusmenetelmän hyvänä puolena se, että valmistuksessa ei muodostuisi poimuja. Shifting-menetelmää käytettäessä lasikuitukankaan touvit on aseteltu  $0^\circ$  ja  $90^\circ$  kulmissa. Tässä menetelmässä puristetaan kangasta  $90^\circ$  suunnassa ja käännetään vapaata päätä kankaasta samansuuntaisesti, kuten kuvassa 12 esitetään. Tässä menetelmässä  $90^\circ$  kulmassa olevat lujitteet pysyvät yhdensuuntaisina toisiinsa verrattuna eikä kuitujen pituus muutu prosessoinnin aikana. Tämän vuoksi myöskään tasosta ulostulevaa poimuisuutta ei esiinny. Kuvassa 13 on havainnollistettu, miten shifting-menetelmässä ei aiheudu poimuisuutta verrattuna steering-menetelmään. [34]

Zhun väitöskirjassa esitetyissä tutkimuksissa prototyypilaitteella testattiin 2D- ja 3D-laminointia. 2D-valmistuksessa testattiin laitteen tarkkuutta ja toistettavuutta. Tämän jälkeen 3D-valmistuksessa tutkittiin, voidaanko shifting-menetelmää hyödyntää oikeassa tuulivoimalan turbiinin lavan valmistuksessa. Kangas, jota tutkimuksessa käytettiin, oli 200 mm leveä  $930 \text{ g/m}^2$  yhdensuuntainen NCF-lasikuitulujite. [34]



**Kuva 12.** Shifting-prosessi kuvattuna yhdessä kankaan osiossa [34].





**Kuva 13.** (a) steering-valmistumenetelmän (esimerkiksi ATL) aikana tapahtuva materiaalin käyttäytyminen, skemaattinen ja todellinen (b) shifting-menetelmän aikana tapahtuva materiaalin käyttäytyminen, skemaattinen ja todellinen [34].

Laitevalmistajat kertovat minkälaisia teippimateriaaleja heidän ATL- ja AFP-laitteillaan voi käyttää ja millaisia erilaisia laitekonfiguraatioita on olemassa. Esimerkiksi MTorres:n TorresLayUp-ATL-laitteella voi käyttää 75 mm, 150 mm tai 300 mm leveitä teippejä niin, että kokonaisleveydeksi tulee 150 mm tai 300 mm. Moniteippivaihtoehto (multitape option) tekee mahdolliseksi sen, että samaan aikaan voidaan käyttää useaa teippirullaa. Vaihtoehdot ovat 1 x 150 mm, 1 x 300 mm, 4 x 75 mm ja 2 x 150 mm. Käyttäen esimerkiksi 2 x 150 mm –teippejä voidaan valmistaa tuotetta, jonka kaarevuussäde on suurempi kuin valmistettaessa tuotetta 300 mm teipistä. Tuotantonopeus saadaan kuitenkin yhtä suureksi kuin yhdellä 300 mm teipillä. Saman valmistajan AFP-laitteistolla TorresFiberLayUp:lla voidaan käyttää kolmea erilaista teipin/touvin leveyttä ja samaan aikaan levittää 12, 16, 24 tai 32 touvia. [35]

Fraunhofer IPT (Saksa) puolestaan on kehittänyt Multi-Material-Head –tape placement –järjestelmän, jossa samassa teippiä levittävässä päässä on mahdollista käyttää kestumuviteippejä, kertamuovi-prepregejä ja kuivia kuitumateriaaleja. Tarkemmat puolivalmiit materiaaliveitohdot ovat hiilikuitu- ja värjätty lasikuitukestumuviteippi, hiilikuitu- ja värjätty lasikuitukertamuovi sekä niin sanotut levitetyt ja kiinnitetyt (spread and bonded) kuivat kuitumateriaalit. Teipin leveys voi olla 6, 12 tai 25 mm ja laitteessa voi lämmönlähteenä olla esimerkiksi laser, infrapuna tai kuuma kaasu. [36]

## 4.2. Prepreg-lujitteet

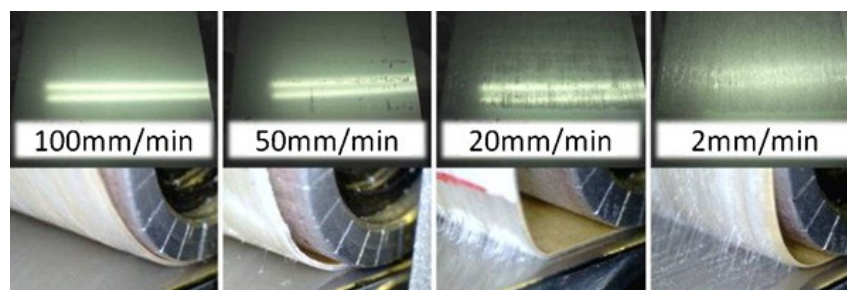
### 4.2.1. Kertamuovit

Kertamuoveista koostuvat prepregit sisältävät lujitekuidut on impregnoitu kertamuovihartsiin. Lujitekuidut voivat olla esimerkiksi hiiltä tai lasia. Kertamuovi taas puolestaan voi olla epoksia tai bismaleimidiä. Tällaiset teipit ovat huoneenlämmössä tarrau-

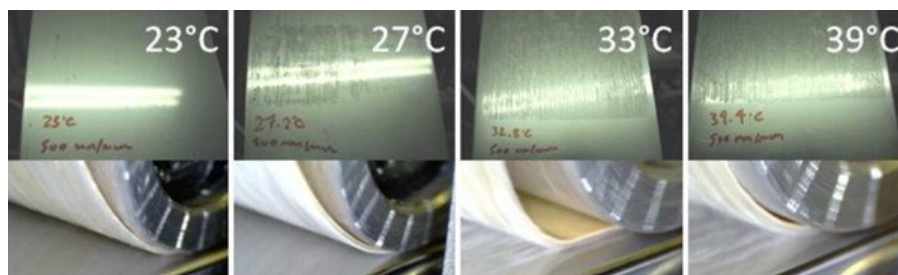
tuvia (tackyness). Teipit valmistetaan ensin B-tilaisiksi ja myöhemmin ne kovetetaan täysin. B-tilaiset prepregit on säilytettävä jäädytettynä eli ATL- ja AFP-laitteistossa on oltava jäädytetty varasto kertamuovi-prepregeille. [10; 29, s. 632]

Kertamuoviprepregin ominaisuuksista on vähemmän tutkimuksia kuin kestopuoviprepregeistä, vaikka käytännön sovellukset hyödyntävätkin kertamuoviprepregejä ainakin ilmailualalla [9, 19]. Crossley *et al.* ovat tehneet tutkimuksen prepregin tarrautuvuudesta eri lämpötiloissa ja syöttönopeuksilla. Tutkimuksessa oli  $400 \text{ g/m}^2$  –yhdensuuntainen E-lasista ja bisfenoli-A-epoksista valmistettu ATL-teippi, jota verrattiin  $194 \text{ g/m}^2$  –yhdensuuntaiseen AS4 hiilikuidusta ja epoksista valmistettuun ATL-teippiin. Hiilikuidusta valmistetun materiaalin tarrautuvuutta pystyttiin parantamaan lämmittämällä materiaalia tai lisäämällä muottiin tartunta-ainetta. Sen sijaan E-lasia sisältäneen teipin tapauksessa lisääntynyt lämpö esti taustapaperin poistoa ja paksuussuuntaista vaurioitumista. Hiilikuituteipissä ei lämpötilan noustessa tapahtunut juurikaan muutosta tarrautuvuudessa. Sen sijaan E-lasi-teipillä tarrautuvuus saavutti huippuarvo  $25\text{--}35 \text{ }^\circ\text{C}$  välillä. Jäykkyys materiaalilla alkoi pudota  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ :ssa. [37]

Samassa tutkimuksessa tutkittiin myös syöttönopeuden vaikutusta. E-lasi-materiaalilla lämpötila pidettiin  $20 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$  ja hiilikuituteipillä  $40 \pm 3\text{--}5 \text{ }^\circ\text{C}$ . Syöttönopeutta nostettiin  $1 \text{ mm/min}$ :sta  $1000 \text{ mm/min}$ :iin. Hiilikuituteipillä tarrautuvuus pysyi samalla matalalla tasolla syöttönopeudesta riippumatta. E-lasi-teipillä tarrautuvuus nousee tasaisesti saavuttaen huippuarvon  $20 \text{ mm/min}$  –nopeudella ja laskien tämän jälkeen. Tätä havainnollistetaan kuvassa 14. [37]



**Kuva 14.** E-lasi-materiaalissa tapahtuvat muutokset eri syöttönopeuksilla lämpötilassa noin  $40 \text{ }^\circ\text{C}$  [37].



**Kuva 15.** E-lasi-materiaalissa tapahtuvat muutokset eri lämpötiloissa syöttönopeudella 500 mm/min [37].

Tutkimuksessa havaittiin syöttönopeuden ja lämpötilan vaikutuksen tarrautuvuuteen noudattavan sulapolymeerien Williams-Landel-Ferry aika-lämpötila-superposition periaatetta. Tutkimuksessa painotettiin myös, että esimerkiksi muotin ominaisuudet vaikuttavat tarrautuvuuteen. Esimerkiksi ruostumattomasta teräksestä valmistetun muotin pinnalla tarrautuvuus on n. 28 °C:ssa suurempi kuin komposiittimuotissa. Ilman muotista irrotusainetta tarrautuvuus oli merkittävästi heikompaa. Tutkimuksessa ei kuitenkaan yksityiskohtaisesti esitelty muottirakenteita tai –materiaaleja ja niiden vaikutuksia tarrautuvuuteen. Muotin ominaisuuksia testattiin tutkimuksessa Cincinnati-yhtiön valmistamalla V4 ATL –laitteella. 4 mm/min –nopeudella merkittävää tarrautumista pintaan tapahtui, mutta 500 mm/min –nopeudella tarttumisessa oli puutteita. Lämpötilan nostaminen ympäristön lämpötilasta 33 °C:seen näytti parantavan tarrautumisessa tuotantonopeuden ollessa 500 mm/min, mutta teipin taustapaperin tarrautuvuus nousi korkeammaksi ja teipin paksuussuuntainen vaurioituminen lisääntyi. Kuvassa 15 on esitetty lämpötilan vaikutuksia E-lasi-materiaalin levitykseen. Ongelmana lämpötilan nostamisessa on siis myös löytää sopiva lämmitysmuoto, jotta ylikuumeneva teippi ei vaurioidu. [37]

Crossley *et al.* suorittamassa tutkimuksessa ei otettu kantaa siihen, johtuvatko erot lujite- tai matriisimateriaalista [37]. On siis mahdollista, että vain matriisimuovi vaikuttaa valmistuksen prosessiparametreihin, eikä ole väliä onko prepregissä lujitteena hiili- vai lasikuitua.

#### 4.2.2. Kestomuovit

Kestomuovipregit sisältävät kestopuovin ja siihen impregnoidun lujitteen, joka yleensä on hiilikuitu. Kestomuovina voidaan käyttää esimerkiksi polyeetteri-eetteri-ketonia, polyeetteri-ketoni-ketonia, polyfenyleenisulfidia tai polyamidia (PA12). [29, s. 632–633] Kestomuovien hyvinä puolina pidetään, että ne ovat vähemmän hauraita, kestävät paremmin väsymistä ja kemikaaleja kuin kertamuovit [19].

Kestomuovipregit ovat kiinteitä huoneenlämmössä. Täten niitä ei tarvitse erikseen viilentää kiinnityksen yhteydessä, mikä nopeuttaa tuotantoa verrattuna kertamuoviprepregeihin. Teippi on lämmitettävä kestopuovin sulamispisteen yläpuolelle, jotta se kiinnittyy muottiin tai aiempiin teippikerroksiin. Kestomuovipregiteipit ovat huoneenlämmössä jäykkiä, joten niitä ei pysty käyttämään yhtä jyrkissä muodoissa kuin kertamuovia. Eli pienin kaarevuussäde kestopuovipregillä ei ole yhtä pieni kuin kertamuovipregillä. [29, s. 632]

Rizzolo ja Walczyk tutkivat AFP-menetelmässä kahden erilaisen kestopuovipregin käyttöä ultraäänilämmitystä käyttäen. Prepregeinä olivat TenCate Ceter TC930 korkea-tiheysinen polyetyleni (HDPE)/lasikuitu UD-teippi, jonka nominaalinen tiheys oli 0,27 mm ja TenCate Cetex TC940 osittaiskiteinen polyetyleni tereftalaatti (PET)/hiilikuitu UD-teippi, jonka nominaalinen tiheys oli 0,2 mm. Näytteet oli valmistettu puristamalla 480 kPa paineella 4 minuutin ajan, lasikuitu 180 °C:ssa ja hiilikuitu 271 °C:ssa, jonka jälkeen ne on jäähdytetty paineen alla. Muuttujina käytettiin lujitemateriaalin kiinnittämisenopeutta (34, 51 tai 102 mm/s) ja ultraäänien taajuusamplitudia. Taajuusamplitudi vaikuttaa siksi, että ultraääni paikallisesti lämmittää materiaalia värähtelyn avulla. [19]

Lasikuidusta valmistettiin näytteeksi yhdensuuntaislujite-teipin lisäksi kvasi-isotrooppiseksi laminoitu näyte, jota prosessoitiin vain nopeudella 34 mm/s. Kaikkien materiaalien lämmitykseen käytettiin ultraääntä. Tutkimuksessa havaittiin, että HDPE/lasikuitu-näytteen jäykkyys putosi 20 % ja lujuus 40 % valmistusnopeuden kolminkertaistuessa. PET/hiilikuitu-näytteen arvot sen sijaan putosivat enemmän, jäykkyys 65 % ja lujuus 49 %. Ultraäänien taajuusamplitudin 10 % muutos ei juurikaan vaikuttanut jäykkyyteen tai lujuuteen. Lasikuidusta valmistettu laminoitu näyte noudatti samasta materiaalista valmistetun teipin tuloksia. Ultraäänellä lämmitystä verrattiin tavalliseen lämmön ja paineen avulla suoritettavaan valmistukseen. Lämmön ja paineen avulla valmistettujen näytteiden lujuus ja jäykkyys nousivat lähes kaksinkertaiseksi. Tutkimuksessa pääteltiin, että ultraäänien prosessiparametrit eivät olleet tutkimuksessa optimaaliset tai lasikuitulujitteen matala lämmönjohtavuus ei sovellu ultraäänien avulla kiinnitettäväksi. Hiilikuidusta valmistetun lujitteen arvot ultraäänikiinnityksessä nimitäin olivat suuremmat kuin lämmön ja paineen avulla saavutetut arvot, varsinkin kiinnityksenopeuden ollessa riittävän alhainen. [19]

Grouve *et al.* tutkivat hiilikuitulujitteisen PPS-UD-teipin ja -kudoksen/laminaatin liitoslujuuksia ATL-menetelmässä. Teippi koostuu yhdensuuntaisista hiilikuiduista ja PPS-matriisista. PPS-matriisin lasisiirtymälämpötila on 85 °C ja sulamispiste 285 °C. Teipin paksuus on 0,15 mm ja leveys 6 mm. Kuidun osuus teipistä valmistajan antamien tietojen perusteella on  $55 \pm 3$  %. Kudoksen koostui kahdeksasta CD286 hiili -säikeestä, jotka on impregnoitu kvasi-isotrooppisesti PPS-matriisiin. Laminaatin kuitupitoisuus on 50 %, paksuus 2,6 mm ja leveys ja pituus 500 mm. Tutkimuksessa verrattiin ATL:n ja puristusmuovauksen vaikutuksia kappaleen murtolujuuteen. Puristusmuovauksessa käytettiin

kahta näytettä, joiden leveys ja pituus olivat joko 200 mm tai 20 mm. Prosessointilämpötila oli 310 °C ja paineena käytettiin ensin 100 kPa, joka nostettiin 600 kPa:iin. Lämpötilaa ylläpidettiin 10 minuutin ajan, jonka jälkeen näyte jäähdytettiin huoneenlämpöön (10 °C/min). Tämän jälkeen laminaateista leikattiin yhteensä 6 näytettä, kunkin näytteen leveyden ollessa 8 mm. [38]

ATL:a käytettäessä vastaavasti teipit kiinnitettiin PPS-laminaattiin diodilaserilla lämmitäen. Laserin aallonpituus oli 980 nm ja teho 2 kW. Hiilikuitulujitetut teipit kiinnitettiin kudosa-laminaattiin 30 mm välein. Teipit asetettiin kohtisuoraan laminaatin kuitu/kimppusuuntaa vastaan. Laminaatin reunaan asetettiin 13 µm:n paksu polyimidi-kalvo, joka toimii särön kasvun alkukohtana ja estää särön ydintymisen vaatiman suuremman (tai pienemmän) energian vaikutuksen standardin mukaiseen murtositkeysarvoon. Valmiit näytteet olivat 250 mm pitkiä. ATL-laitteiston prosessointi-parametrit olivat 275 °C tai 300 °C lämpötila, 450 kPa paine ja teipin 150 mm/s levitysnopeus. [38]

Teipin ja laminaatin rajapinnan välistä murtositkeyttä testattiin sylinterin avulla tehtävällä adheesiotestillä (mandrel peel test). Riippumatta testatun revityn kaistaleen pituudesta, puristusmuovautuneen kappaleen murtositkeys oli puolet vastaavan ATL:lla valmistetun kappaleen murtositkeydestä. Lisäksi tutkimuksessa havaittiin, että korkeammalla lämpötilalla 300 °C murtositkeys oli parempi kuin matalalla 275 °C lämpötilalla. [38]

Toinen Grouven tutkimusryhmän tekemä tutkimus otti huomioon lämpötilan ja prosessointinopeuden. Tutkimuksessa käytettiin vastaavia materiaaleja kuin edeltävässä tutkimuksessa. Teippien väli oli 25 mm ja polyimidi-kalvon paksuus 25 µm. Lämpötila vaihteli 250–325 °C ja prosessointinopeus oli 25, 50, 100, 150, 200 ja 250 mm/s. Paineena käytettiin 600 kPa. Tuloksista huomattiin, että prosessointinopeuden ollessa 150 mm/s tai suurempi, ei lämpötilalla enää ollut vaikutusta murtositkeyteen. Matalammilla nopeuksilla murtositkeys oli sitä suurempi mitä korkeampi lämpötila oli käytössä. Yleisesti tutkimuksessa havaittiin, että mitä korkeampia lämpötila ja prosessointinopeus olivat, sitä parempi on kerrostenvälinen lujuus. Murtositkeyden arvot nousivat lämpötilan ja nopeuden noustessa. [38]

**Taulukko 2.** Esimerkkejä eri valmistajien ATL- ja AFP-materiaaleista [39-43].

Valmistaja	Tuote	Tyyppi	Matriisi	Leveys, muut tiedot
<b>Hexcel</b>	Hextow	Jatkuva tai katkokuitu UD-teippi	Kesto- tai kerta-muovi	-
	Hexply	Prepreg, hiilikuitu, lasikuitu	Kertamuovi	Leveys 3,2–300 mm, levitysnopeus 30–60 m/min
	Hitape	Kuiva teippi, hiilikuitu	Kestomuovikalvo	Leveys 500 mm asti
<b>Cytec Solvay Group</b>	TX1100	Kuiva teippi, hiilikuitu	-	-
	MTM44-1	Hiilikuitu-prepreg	Kertamuovi	-
<b>Toho Tenax</b>	Tenax Thermo-Plastics	Hiilikuitu	Kestomuovi	6–300 mm
<b>Tencate</b>	Cetex	Prepreg, hiilikuitu	Kestomuovi	Esim. 75, 150, 300 mm
	TC- ja RS-sarja	Prepreg, hiilikuitu	Kertamuovi	6–25 mm, yli 50 mm
<b>North Thin Ply Technologies</b>	ThinPreg	Prepreg, hiilikuitu, myös lasikuitu, aramidi	Kertamuovi	300 mm

Taulukkoon 2 on koottu muutama ATL- ja AFP-valmistukseen materiaaleja tekevät yritykset. Taulukossa on esitelty tuotesarja, jota valmistajan mukaan käytetään ATL:ssa tai AFP:ssa, materiaalin tyyppi lujitteineen ja matriiseineen, leveysvaihtoehdot sekä mahdolliset muut tiedot. Materiaalivalmistajia on lukuisia ja ne voivat tarjota merkittävästi toisistaan eroavia tuotteita, kuten esimerkiksi Veldenz *et al.* tutkimuksessaan havainnoivat [21].

## 5. SOVELLUSKOHTEET

### 5.1. Energiateollisuus

Uusiutuvia energialähteitä hyödyntävien laitteistojen valmistuksessa käytetään paljon prepreg-teippejä [9]. Tuulivoimaloissa olevien pisimpien siipien mitat ovat niin suuret, että lasikuidulla ei yksinään saada riittävää jäykkyyttä ja väsymislujuutta. Tämän vuoksi turbiinin lavoissa on käytetty osittain myös hiilikuitua lujitteena lasikuidun lisäksi. Huomioitavaa on, että tuulivoimaloiden siivet ovat jo alusta lähtien valmistettu lujitemuovisista komposiiteista erilaisilla valmistusmenetelmillä. [2, s. 441–442]

Tuulivoimaloiden turbiinien lapojen valmistuksessa halutaan pyrkiä edullisiin ja paksuihin laminaatteihin, tämän vuoksi siivet valmistetaan pääosin infuusiolla, osittain myös käsinlaminoimalla ja prepregeistä. Joitakin yksittäisiä esimerkkejä ATL:n käytöstä kuitenkin löytyy. [37]

Fives-Cincinnati-yhtiön (Ranska) ATL-laitteilla voi valmistaa osia tuulivoimaloihin. Nii- den rakenteet ovat riittävän yksinkertaisia ja Forest-Liné ATLAS ONE ja Forest-Liné ATLAS ACCESS käyttävät hiili-prepregejä ja tarvittaessa myös lasikuitumateriaalia on mahdollista käyttää. Suurin mahdollinen kappale voidaan rakentaa ATLAS-laitteella mittojen ollessa 40 x 6,5 x 1,2 m. [44]

Tuulivoimaloiden turbiinien lapojen koko on ajan myötä kasvanut. Mitä suuremmat lavat turbiinissa on, sitä enemmän tehoa voimalasta saadaan. Tämän vuoksi edellä esiteltyt Fives-yhtiön laitteet eivät sovellu suurimpien turbiinin lapojen valmistukseen. Esimerkiksi vuonna 2011 oli suurimman turbiinin lavan pituus 73,5 m. Jotta tuulienergian käyttö olisi tehokasta, tulisi tuulivoimaloiden valmistus saada taloudelliseksi. Osittain tähän voidaan vaikuttaa lapojen painoa pienentämällä. Tuulivoimaloiden komposiittiosissa on käytetty perinteisesti lasikuitua. Se on edullisempaa kuin hiilikuitu, mutta painaa enemmän korkean tiheydensä vuoksi. [10, 27] Hintaan vaikuttaa myös komposiitissa käytettävän lujitteen muoto. Prepreg-teipit ovat kalliimpia kuin kuivat lujitteet, joten ATL- ja AFP-laitteiden tulisi pystyä käyttämään kuivia lujitteita, jotta niitä voidaan käyttää tuulivoimaloiden valmistukseen. [30] Useat valmistajat kertovat, että heidän valmistamiaan ATL- tai AFP-laitteita voi käyttää myös tuulienergiateollisuudessa, mutta käytännön kohteita ei ole juurikaan mainittu [44, 45].

### 5.2. Ilmailuteollisuus

Lentokoneteollisuudessa automatisoituja valmistusmenetelmiä on käytetty ainakin 1970-luvulta lähtien. Tuolloin käytetyt laitteet oli rakennettu yritysten sisällä omaan käyttöön. [9] Muilla tavoin valmistettuja komposiittiosia sen sijaan on käytetty 1930-luvulta

lähtien esimerkiksi sotilaskoneissa. Matkustajalentokoneissa komposiittien käyttöä ovat rajoittaneet tiukat turvallisuusmääräykset ja vaativat tekniset validoinnit. [2, s. 433]

Ilmailualalla käytetään paljon prepreg-teippejä ATL- ja AFP-valmistuksessa [9]. MTorres käyttää matkustajalentokoneiden valmistuksessa TorresLayUp-konetta esimerkiksi erilaisissa Airbus- ja Boeing-koneiden osien valmistuksessa. Myös sotilaskäyttöön tarkoitetuissa Embraer KC390- ja Eurofighter Typhoon –koneissa käytetään tiettyjen osien valmistuksessa kyseistä laitetta. [35]

MTorres hyödyntää hiilikuitua ATL- ja AFP-laitteissa. Esimerkiksi Boeing B787 –matkustajalentokoneessa lentokoneen rungon osia on valmistettu Torres FiberLayUp:lla ja TorresLayUp:lla (ATL) esimerkiksi vaakasuuntainen korkeusvakaaja, rahtitilan ovi ja rungon pitkittäispalkki. Eri Airbus-lentokoneiden tyypeissä (A320, A330, A340, A350, A380) MTorresin ATL-laitteistoa on käytetty sivu- ja korkeusvakaajien valmistuksessa. Lisäksi eri Bombardier-, Boeing- ja Airbus- malleissa on ATL:lla valmistettu mm. koneen rungon pintalevyjä, keskisiiven rakenteita, pyrstökartioita sekä siiven etu- ja salkoja. [35]

MTorresin ATL:a ja AFP:a hyödyntävää, vaihdettavalla päällä varustettua laitetta käytetään esimerkiksi Airbus A350 XWB –lentokoneen siiven pintalevyn valmistamiseen. Koska tätä MTorresin valmistuslaitetta voidaan käyttää sekä ATL- että AFP-pään avulla, saadaan koko valmistusprosessi joustavaksi ja nopeaksi. Laitteen seisonta-aika vähenee nostoen tuottavuutta. Lisäksi eri päiden avulla voidaan käyttää eri materiaaleja. [24]

Fives/Cincinnati-yhtiön ATL- ja AFP-laitteet pystyvät valmistamaan erilaisia osia lentokoneisiin. ATL-laitteet Forest-Liné ATLAS ja Forest-Liné ATLAS One käyttävät 150 mm tai 300 mm leveitä hiili-prepreg-teippejä esimerkiksi siiven pintalevyn tai lentokoneen peräosan valmistukseen. Syöttönopeus on korkeintaan 60 m/min ja näillä kahdella laitesarjalla voidaan valmistaa joko täysin tasaisia tai yhteen suuntaan kaarevia kappaleita. Kaksoiskaarevia eli monimutkaisempia kappaleita voidaan valmistaa Cincinnati VIPER AFP-laitteella. Tällä laitteella on valmistettu lentokoneen runkoja tai lentokoneen siiven pintalevyjä. Tällä laitteella on mahdollista käyttää myös kuivia lujitteita. [44]

Ilmailualalla ATL:ssa käytettävät materiaalit ovat usein yhdensuuntaislujitettua hiilikuitua sisältävää epoksi-prepregiä. Hiilikuidun ansiosta materiaalin neliöpaino saadaan alemmaksi kuin lasikuitua käyttämällä. Esimerkiksi alle 200 g/m<sup>2</sup> on tyypillisen hiilikuituprepregin neliöpaino ATL-sovelluksissa lentoteknisissä sovelluksissa. [37]

### 5.3. Auto- ja veneteollisuus

Veneteollisuus on hyödyntänyt komposiittien valmistusta jo 1940-luvulta lähtien. Erilaisissa venetyypeissä, esimerkiksi huvi- ja purjeveneissä, erilaisia osia valmistetaan komposiiteista. Valmistussarjat vene- ja laivateollisuudessa ovat tyypillisesti pieniä.



[2, s. 436] Tämän vuoksi automatisoidut valmistusmenetelmät eivät ole yleistyneet. Pre-preg-teipit ovat kalliimpia kuin kuivat lujitteet, joten jos edullisempia materiaaleja pystyttäisiin käyttämään ATL- tai AFP-prosessissa, voisi kyseisiä valmistusmenetelmiä käyttää myös veneteollisuudessa.

Autoteollisuudessa komposiiteista on erilaisilla valmistusmenetelmillä valmistettu esimerkiksi puskureita tai sisä rakenteissa olevia levymäisiä osia sarjatuotannossa oleviin automalleihin. Pienempinä sarjoina valmistettavissa malleissa komposiittiosia voi olla enemmänkin. Lujitteena käytetään E-lasikuitua, mutta myös hiilikuitua. [2, s. 434–435]

Voith on kehittänyt autoteollisuuden käyttöön Voith Roving –laitteen, jolla pystytään levittämään kuivia, 50 mm leveitä hiilikuitupreformeja. Kyseistä laitetta käytetään valmistamaan Audi A8 –malliin hiilikuitulujitettu hattuhylly ja takaosan tukirakenne. [32]

## 6. YHTEENVETO

Työn tarkoituksena oli selvittää kirjallisuuden avulla kuivien lujitteiden käyttöä ATL:ssa. Lisäksi tarkoituksen oli tutustua myös prepreg-materiaaliin ja vertailla ATL:a ja AFP: a. Prepreg-materiaalit ovat yleisemmin käytössä ja niistä löytyi runsaasti tutkimuksia, kun taas kuivista lujitteista tietoa oli saatavilla vähemmän. Erityisesti lasin käyttöön oli tarkoitus perehtyä, mutta kuivien lujitteiden käyttö kirjallisuuskatsauksen perusteella keskittyy hiilikuituun. Materiaalivalmistajat kertovat omien laitteidensa pystyvän myös käyttämään lasikuitua, mutta todellisia sovelluksia kuivalle lasikuidulle ei kirjallisuudessa juurikaan raportoitu.

Kirjallisuusselvityksen aikana selvisi ATL- ja AFP-laitteiden yhtenevyydet ja erot. Suurimpana erona on käytettävien materiaalien leveys, joka ATL:ssa on 75–300 mm ja AFP:ssa 3–12 mm. Lisäksi AFP:lla on mahdollista valmistaa pienempiä yksityiskohtia sisältäviä, pienemmän pyörityssäteen muotoja, mutta tuotantonopeus ei nouse aivan yhtä suureksi kuin ATL:ssa.

Työssä havaittiin, että prepreg-materiaalit ovat yleisimmin käytetyt materiaalit ja niiden valmistajia löytyy runsaasti. Erilaisia prepreg-materiaaleja on runsaasti. Lujitteen määrä ja ominaisuudet vaihtelevat suuresti, kuten myös matriisina käytetyn kerta- tai kesto-muovin ominaisuudet. Hiilikuitumateriaalin käyttö prepregeissä oli suurempaa, kuten myös kuivien lujitteiden tapauksessa. Tämä saattaa johtua siitä, että komposiitteja on käytetty ilmailualalla runsaasti ja hiilikuidun keveys verrattuna lasikuituun on ollut ylivoimainen ominaisuus ilmailualalla. Kuivat lujitteet olisivat edullisempia materiaaleina kuin prepregit, mutta niiden prosessointi on tällä hetkellä vaikeampaa kuin prepregien. Osittain tämäkin on saattanut pitää prepregit valtamateriaalina automatisoiduissa laminointiprosesseissa.

Lasikuidulla ja hiilikuidulla, jotka ovat yleisimmin käytetyt lujitekuidut, on erilaisia ominaisuuksia. Esimerkiksi lämmönjohtavuus niillä on erilainen, mikä vaikuttaa merkittävästi tarrautuvuuteen ja kiinnittymiseen. Lasikuitulujitteen valmistusnopeutta ei esimerkiksi Rizzolon ja Walczykin tutkimuksessa saatu kehitettyä yhtä nopeaksi kuin hiilikuidun. Valmistukseen vaikuttavat useat prosessiparametrit, joita optimoimalla valmistusnopeutta ja tuotteen laatua saadaan parannettua.

Kuivista lujitteista tehtyjen tutkimusten perusteella, kuivia lujitteita hyödynnetään enimmäkseen AFP-laitteistolla.

## LÄHTEET

- [1] W.D. Callister, D.G. Rethwisch, Materials science and engineering, 8th ed. John Wiley & Sons, New York, 2011, 992 p.
- [2] O. Saarela, I. Airasmaa, J. Kokko, M. Skrifvars, V. Komppa, Komposiittirakenteet, Muoviyhdistys ry, Helsinki, 2007, 494 p.
- [3] D.S. Dandy, What Is Chemical Engineering?, Colorado State University, 2007. Saatavissa (noudettu 10.8.2017): <http://navier.engr.colostate.edu/whatische/ChEL05Body.html>.
- [4] J. Pilling, Tensile Behaviour of Continuous Fibre Reinforced Metal Matrix Composites, University of Manchester, 2006. Saatavissa (noudettu 10.8.2017): <http://www.mse.mtu.edu/~drjohn/my4150/compositesdesign/cd2/cd3.html>.
- [5] M. Kanerva, Composites-lecture slides, Tampere University of Technology, 2017.
- [6] J. Frketic, T. Dickens, S. Ramakrishnan, Automated manufacturing and processing of fiber-reinforced polymer (FRP) composites: An additive review of contemporary and modern techniques for advanced materials manufacturing, Additive Manufacturing, Vol. 14, 2017, pp. 69–86. Saatavissa (noudettu 21.7.2017): <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214860417300295>.
- [7] M.Y. Matveev, P.J. Schubel, A.C. Long, I.A. Jones, Understanding the buckling behaviour of steered tows in Automated Dry Fibre Placement (ADFP), Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol. 90, 2016, pp. 451–456. Saatavissa (noudettu 21.7.2017): <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359835X16302706>.
- [8] F.O. Sonmez, M. Akbulut, Process optimization of tape placement for thermoplastic composites, Composites Part A, Vol. 38, Iss. 9, 2007, pp. 2013–2023. Saatavissa (noudettu 10.8.2017): <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359835X07000814>.
- [9] D. H.-J.A. Lukaszewicz, C. Ward, K.D. Potter, The engineering aspects of automated prepreg layup: History, present and future, Composites Part B: Engineering, Vol. 43, Iss. 3, 2012, pp. 997–1009. Saatavissa (noudettu 21.7.2017): <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359836811005452>.

- [10] K.K. Chawla, *Polymer Matrix Composites, Composite Materials*, Springer New York, 2012, 542 p.
- [11] U.P. Breuer, *Manufacturing Technology, Commercial Aircraft Composite Technology*, Springer International Publishing, 2016, pp. 73–132.
- [12] O. Rimmel, D. Becker, P. Mitschang, Maximizing the out-of-plane-permeability of preforms manufactured by dry fiber placement, *Advanced Manufacturing: Polymer & Composites Science*, Vol. 2, Iss. 3–4, 2016, pp. 93–102. Saatavissa (noudettu 7.9.2017): <http://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/20550340.2016.1260900>.
- [13] Fiber Placement Robot, Coriolis Composites, verkkosivu. Saatavissa (noudettu 7.9.2017): <http://www.coriolis-composites.com/products/fiber-placement-process.html>.
- [14] P. Zhang, R. Sun, X. Zhao, L. Hu, Placement suitability criteria of composite tape for mould surface in automated tape placement, *Chinese Journal of Aeronautics*, Vol. 28, Iss. 5, 2015, pp. 1574–1581. Saatavissa (noudettu 26.7.2017): <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S100093611500103X>.
- [15] M.P. Wiehn, R.D. Hale, Low cost robotic fabrication methods for tow placement, 47th International SAMPE Symposium, Long Beach California, USA, 2002.
- [16] F.C. Campbell, *Manufacturing Processes for Advanced Composites*, Elsevier Science, GB, 2004, 517 p.
- [17] M. Belhaj, M. Deleglise, S. Comas-Cardona, H. Demouveau, C. Binetruy, C. Duval, P. Figueiredo, Dry fiber automated placement of carbon fibrous preforms, *Composites Part B: Engineering*, Vol. 50, 2013, pp. 107–111. Saatavissa (noudettu 10.8.2017): <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01006755>.
- [18] Fiber Placement - quick and economic, Composite Layups, Compositence, verkkosivu. Saatavissa (noudettu 17.9.2017): <http://www.compositence.com/en/fiber-placement>.
- [19] R.H. Rizzolo, D.F. Walczyk, Ultrasonic consolidation of thermoplastic composite prepreg for automated fiber placement, *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, Vol. 29, Iss. 11, 2016, pp. 1480–1497. Saatavissa (noudettu 10.8.2017): <http://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/0892705714565705>.
- [20] TorresFiberLayUp, MTorres, verkkosivu. Saatavissa (noudettu 10.8.2017): <http://www.mtorres.es/en/aeronautics/products/carbon-fiber/torresfiberlayup>.

- [21] L. Veldenz, M. Di Francesco, S. Astwood, G. Dell'Anno, B.C. Kim, K.D. Potter, Characteristics and processability of bindered dry fibre material for automated fibre placement, ECCM 2016 - Proceeding of the 17th European Conference on Composite Materials., 2016. Saatavissa (noudettu 21.7.2017): [https://www.researchgate.net/publication/304896784\\_CHARACTERISTICS\\_AND\\_PROCESSABILITY\\_OF\\_BINDERED\\_DRY\\_FIBRE\\_MATERIAL\\_FOR\\_AUTOMATED\\_FIBRE\\_PLACEMENT](https://www.researchgate.net/publication/304896784_CHARACTERISTICS_AND_PROCESSABILITY_OF_BINDERED_DRY_FIBRE_MATERIAL_FOR_AUTOMATED_FIBRE_PLACEMENT).
- [22] Automated Fiber Placement -machine developments, Electroimpact, verkkosivu. Saatavissa (noudettu 10.8.2017): [https://www.electroimpact.com/WhitePapers/Automated\\_Fiber\\_Placement\\_machine\\_Developments-SME.pdf](https://www.electroimpact.com/WhitePapers/Automated_Fiber_Placement_machine_Developments-SME.pdf).
- [23] Composite Technology, Camozzi Group, verkkosivu. Saatavissa (noudettu 17.9.2017): <http://www.camozzimachinetools.com/en/camozzigroup/machine-tools/products/composite-technology>.
- [24] Laying Down the Fibre - Fast!, Aerospace Manufacturing Magazine, 2016, pp. 24–25. Saatavissa (noudettu 10.8.2017): [ww.mtorres.es/download/file/fid/3190](http://www.mtorres.es/download/file/fid/3190).
- [25] D. Wells, A. Walker, Accurate Robot System with Multiple Composites Processes, Advanced Composite Manufacturing for Aerospace, Saatavissa (noudettu 7.9.2017): [http://www.sme.org/uploadedFiles/Smart\\_Manufacturing\\_Education\\_Series/Rudberg-Todd.pdf](http://www.sme.org/uploadedFiles/Smart_Manufacturing_Education_Series/Rudberg-Todd.pdf).
- [26] Combined AFP and ATL from Mikrosam, Inside Composites, verkkosivu. Saatavissa (noudettu 10.8.2017): <http://www.insidecomposites.com/combined-afp-and-atl-from-mikrosam/>.
- [27] J. Zangenberg, P. Brøndsted, M. Koefoed, Design of a fibrous composite pre-form for wind turbine rotor blades, Materials & Design (1980–2015), Vol. 56, 2014, pp. 635–641.
- [28] H. Janssen, T. Peters, C. Brecher, Efficient production of tailored structural thermoplastic composite parts by combining tape placement and 3d printing, Procedia CIRP, Vol. 66, 2017, pp. 91–95.
- [29] G. Albers Robert, W. Beckwith Scott, Hubert Pascal, Processing Different Materials with Same Fiber Placement Robot, in: Anonymous (ed.), SAMPE 2010 - New Materials and Processes for a New Economy, Seattle WA, May 17–20, 2010, Society for the Advancement of Material and Process Engineering (SAMPE), 2010, pp. 2191.

- [30] G. Gardiner Dry fiber placement: Surpassing limits. Saatavissa (noudettu 10.8.2017): <http://www.compositesworld.com/articles/dry-fiber-placement-surpassing-limits>.
- [31] ADMP Automated Dry Material Placement, Danobat Composites, verkkosivu. Saatavissa (noudettu 17.9.2017): [http://www.danobatcomposites.com/wp-content/uploads/2016/09/2016\\_ADMP\\_Aero\\_en.pdf](http://www.danobatcomposites.com/wp-content/uploads/2016/09/2016_ADMP_Aero_en.pdf).
- [32] A. Jacob Voith demonstrates Industry 4.0 carbon fibre manufacture with Audi part, Inside Composites, verkkosivu. Saatavissa (noudettu 17.9.2017): <http://www.insidecomposites.com/voith-demonstrates-industry-40-carbon-fibre-manufacture-with-audi-part/>.
- [33] J. Ufer, M. Göttinger, L. Herbeck, Preform Technology for High Volume Manufacturing of Long Fiber Reinforced Structures, LCC Symposium, 12th September, 2014.
- [34] S. Zhu, An automated method for the layup of fiberglass fabric, ProQuest Dissertations Publishing, 2013, 100 p. Saatavissa (noudettu 10.8.2017): [www.imse.iastate.edu/files/2015/12/Dissertation\\_Siqi-Zhu.pdf](http://www.imse.iastate.edu/files/2015/12/Dissertation_Siqi-Zhu.pdf).
- [35] TorresLayUp - Automatic Tape Layer Machine, MTorres, verkkosivu. Saatavissa (noudettu 10.8.2017): <http://www.mtorres.es/en/aeronautics/products/carbon-fiber/torreslayup>.
- [36] Multi-material-head – automated processing of various fiber-reinforced semi-finished product, Fraunhofer IPT, Saatavissa (noudettu 10.8.2017): [https://www.ipt.fraunhofer.de/content/dam/ipt/de/documents/Produktbl%C3%A4tter/602\\_Multi-Material-Head-Automatisierte-Verarbeitung-verschiedener-Faserverbundhalbzeuge\\_prs\\_16.pdf](https://www.ipt.fraunhofer.de/content/dam/ipt/de/documents/Produktbl%C3%A4tter/602_Multi-Material-Head-Automatisierte-Verarbeitung-verschiedener-Faserverbundhalbzeuge_prs_16.pdf).
- [37] R.J. Crossley, P.J. Schubel, N.A. Warrior, Experimental determination and control of prepreg tack for automated manufacture, *Plastics, Rubber and Composites*, Vol. 40, Iss. 6–7, 2011, pp. 363–368. Saatavissa (noudettu 10.8.2017): <http://dx.doi.org/10.1179/174328910X12777566997810>.
- [38] W.J.B. Grouve, L.L. Warnet, B. Rietman, R. Akkerman, On the weld strength of in situ tape placed reinforcements on weave reinforced structures, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 43, Iss. 9, 2012, pp. 1530–1536. Saatavissa (noudettu 10.8.2017): <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359835X1200139X>.

- [39] Maximize Your Design & Manufacturing Potential, Cytec Industries Inc., verkkosivu. Saatavissa (noudettu 17.9.2017): <http://www.cytec.com/prism/#product2>.
- [40] Product Data Sheet Tenax®-E TPUD PEEK-HTS45, Toho Tenax. Saatavissa (noudettu 17.9.2017): <http://www.tohotenax-us.com/products/pls033.pdf>.
- [41] Hexcel Products, Hexcel Corporation, verkkosivu. Saatavissa (noudettu 17.9.2017): <http://www.hexcel.com/Products/>.
- [42] North Thin Ply Techonology Products, North Thin Ply Technology, verkkosivu. Saatavissa (noudettu 17.9.2017): <http://www.thinplytechnology.com/products.php>.
- [43] Tencate Product Explorer, Tencate Composites, verkkosivu. Saatavissa (noudettu 17.9.2017): <https://www.tencatecomposites.com/product-explorer>.
- [44] Composites Systems, Fives, verkkosivu. Saatavissa (17.9.2017): <http://metal-cutting-composites.fivesgroup.com/products/composites/composites-systems.html>.
- [45] Mikrosam Automated Fiber and Tape Placement (AFP/ATL), Mikrosam, verkkosivu. Saatavissa (noudettu 10.8.2017): <http://mikrosam.com/new/article/en/automated-fiber-placement-the-complete-system/>.